

Resilience Assessment and Enhancement of China Southern Power Grid under Seismic Hazards

Jiangyu Sun¹, Lei Wang², Zhaoyu Tan², Yongchao Wu², Min Li², Chuang Liu³

¹Qijing Bureau, EHV Power Transmission Company, CSG, Qijing Yunnan

²Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan Hubei

³School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: dobthy@163.com

Received: Jul. 8th, 2017; accepted: Jul. 23rd, 2017; published: Jul. 26th, 2017

Abstract

Safe and stable operation of electric power grids is critical to economic prosperity, national security, public health and safety. However, in earthquake-prone areas, a severe earthquake may simultaneously cause extensive component failures in a power grid and lead to cascading failures within it and across other power-dependent utility systems. Hence, the seismic resilience of power systems is crucial to ensure their rapid recovery and support the needs of the population in disaster areas. This paper introduces a probabilistic modeling approach for quantifying the seismic resilience of contemporary electric power grids. This approach includes an earthquake scenario generation model, component fragility models, a power grid performance model, and a system restoration model. These coupled four models enable quantifying seismic resilience. This paper applies the proposed approach to the seismic resilience assessment of the China Southern Power Grid, and several resilience strategies have been introduced to display how seismic resilience can be improved.

Keywords

Power Grid, Seismic Hazards, Post-Disaster Restoration, Resilience Assessment, Resilience Enhancement

南方电网在地震灾害下的弹性评估与改进

孙江玉¹, 王磊², 覃兆宇², 武永超², 李敏², 刘创³

¹南方电网超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖

²国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉

³华中科技大学自动化学院, 湖北 武汉

Email: dobthy@163.com

收稿日期: 2017年7月8日; 录用日期: 2017年7月23日; 发布日期: 2017年7月26日

摘要

电网的安全稳定运行对于经济繁荣, 国家安全和公共卫生安全至关重要。然而在地震多发地区, 高烈度地震的发生可能同时造成电网中的大量设施元件损坏, 并导致电网内部和依赖电力供应的基础设施系统发生级联故障。因此, 电网的弹性对于确保电力快速恢复和保障受灾人民电力需求至关重要。本文介绍了一种概率性的建模方法以对当前电网的弹性进行量化评估。这种方法包括地震情形生成模型, 元件脆弱性模型, 电网功能变化模型和元件恢复模型。综合这四个模型可以量化电网的弹性。本文应用上述方法对中国南方电网的弹性进行了评估, 并提出了弹性策略以改进电网弹性。

关键词

电网, 地震灾害, 灾后恢复, 弹性评估, 弹性改进

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代社会正常运转及经济快速发展极度依赖于可靠的电力支持, 电力一旦中断, 银行与金融系统、交通系统、通信系统、供水系统等关键基础设施系统都将瘫痪, 将对人们的正常生活产生极大影响并对整个社会造成巨额的经济损失。上世纪以来, 全球范围内发生了多次重大停电事故, 譬如, 2012年7月30日和31日, 印度北部和东部地区连续发生两次大面积停电事故, 这两次停电事故覆盖了一半以上的国土, 直接影响6亿多人的生活。突如其来的断电导致交通陷入混乱, 全国超过300列火车停运, 首都新德里的地铁也全部停运, 造成旅客大量滞留, 公路交通出现大面积拥堵。一些矿工被困井下。银行系统陷入瘫痪, 一度给印度的金融交易带来障碍[1]。

引发停电事故的原因有很多, 一般有电气设备老化、电力供应紧张、电厂或电网工人误操作和自然灾害等。数据统计显示有很大一部分停电事故是由自然灾害引发的, 在我国2010年的电网故障中, 由自然灾害引发的有30起, 占总故障数的57% [2], 而其中影响最大的莫过于地震灾害。新中国成立以来, 国内因地震灾害导致的大面积停电事故时有发生: 1) 2014年8月3日云南省鲁甸发生6.5级强震, 地震造成110KV线路跳闸1条, 10KV线路跳闸15条, 35KV变电站停运3座, 累计造成10个乡镇停电, 影响3.8万户居民用电[3]; 2) 2008年5月12日四川省汶川发生8.0特大地震, 地震导致四川、重庆、陕西、甘肃等地110多个县市电网不同程度受损, 其中四川电网累计有170余座35KV及以上变电站、1000余条10KV及以上线路停运, 25座发电厂与系统解列, 涉及装机容量5635MW, 停电用户累计达246万户[4]; 3) 1996年5月3日哈尔滨包头发生6.4级地震, 包头一电厂、二电厂3台10万KW机组停机, 变电站多处设备损坏, 张家营变电站母线避雷器折断落地, 全站停止供电达11个小时[5]; 4) 1976年7月28日河北省唐山发生7.8级大地震, 唐山地区各大发电厂悉数停止运转, 33座35KV及以上变电站停

电,唐山电网完全瘫痪,与外界的输电线路全部断开,唐山地区因地震断电时间长达1个月[6]。

地震灾害的频繁发生对电网造成了巨大的影响,大量学者投入到电网在地震灾害下性能的研究中,研究了地震灾害下电网的风险、可靠性、脆弱性等,试图从灾前防御的角度降低地震对电网造成的损失。风险主要采用灾害发生概率与后果不确定性的乘积来度量灾害事件的影响,Poljansek [7]等研究了欧洲电力系统的地震风险;可靠性通常被定义为在给定灾害条件下系统完成既定功能的能力,采用概率描述,Ang [8]等研究了洛杉矶地区电网的地震可靠性,Vanzi [9]研究了意大利中南部电网的地震可靠性,Zhigang [10]等研究了中国部分电网的地震可靠性;脆弱性是指在给定灾害事件下系统性能下降的幅度,Raschke [11]等分析了瑞士电网在地震灾害下的脆弱性,Cavalieri [12]等研究了IEEE-118 电网的地震脆弱性。弹性主要描述系统灾前预防、灾中降低灾害后果以及灾后快速恢复的综合能力。但是众所周知,发生地震是不可避免的,到目前为止全世界依然没有解决地震预测的问题。因此我们可以从提高灾后电网性能恢复速度的角度来考虑降低电网地震损失,为此学界引入了弹性的概念。弹性概念最早起源于生态学,由美国学者 Holling [13]于1973年提出,他将其定义为在维持系统结构、功能和反馈等不变的前提下,通过调整系统状态变量和驱动变量等参数,系统能吸收的扰动量。随后不同的学科开始介入研究,不同学科的研究侧重点不同,有的学科强调缓冲力,有的强调灾后恢复的速度。弹性通常被定义为一个系统抵御破坏、吸收破坏的影响和在被破坏后快速恢复的能力。它吸收了风险、脆弱性、可靠性和鲁棒性等指标的的优点。对于电网而言,弹性用来描述电网灾前预防、灾中降低灾害后果以及灾后快速恢复的综合能力。对电网在地震灾害下的弹性进行分析,可有效地从灾前灾中灾后三个方面采取措施提高电网的弹性,降低其在地震灾害中遭受的损失。Shinozuka [14]等研究了洛杉矶电网在1994年北岭地震后的弹性,Espinoza [15]等研究了英国电网在洪水和暴风雨等自然灾害状况下的弹性,欧阳敏[16]等研究了美国德克萨斯州电网在飓风灾害下多个维度的弹性。

然而,以上这些研究中针对电网在地震灾害下的弹性研究还较少,同时这些研究多是针对单一地震情形,几乎未考虑多地震带的情形。本文以中国南方电网的高压输电线路为例,通过在南方五省输电线路所经区域内的八条地震带上模拟产生出数万种地震情形,利用地震动衰减方程估算各个电网元件所处位置的地震动强度,结合电网元件脆弱性曲线计算其达到不同损坏程度的概率,同时结合变电站性能恢复曲线估算变电站在不同损坏状态下被修复完好所需的时间,从而得到南方电网的功能变化曲线,进而计算电网在地震灾害下的弹性。通过对变电站进行加固,降低其损坏概率,达到提高电网在地震灾害下弹性的目的。

2. 电网地震弹性评估框架

在本文中弹性被定义为电网在地震前预防、震中降低灾害后果以及震后快速恢复的综合能力。如图1所示为电网在地震灾害下的功能变化曲线,在 t_0 时刻电网所在区域遭遇一场地震袭击,电网性能急剧下降,到 t_1 时刻电网性能达到稳定状态, t_1 到 t_E 之间电网经过反应和修复过程,性能逐步恢复到正常水平。

整个过程可以分为三个阶段,故障预防期($0 \leq t \leq t_0$),相继故障期($t_0 < t \leq t_1$)和灾后评估与系统修复期($t_1 < t \leq t_E$),这三个阶段也反映了电网故障预防、吸收灾果和故障恢复的综合能力。 $P_R(t)$ 为电网实际性能曲线, $P_T(t)$ 为目标性能曲线,电网的功能变化曲线反映了电网的弹性,可用于量化弹性,在一次给定地震事件下电网的弹性为电网实际性能曲线(即功能变化曲线)与坐标轴在时间0到 T 之间围成的面积和目标性能曲线与坐标轴在时间0到 T 之间围成的面积之比,其量化公式如下:

$$R(T) = \int_0^T P_R(t) dt / \int_0^T P_T(t) dt \quad (1)$$

对电网在地震灾害下的弹性进行评估主要包括五个部分,如图2所示。首先将电网中的发电站、变电站和换流站等各类电站抽象为节点,将这些电站之间的线路抽象为边,建立电网的网络化描述模型。

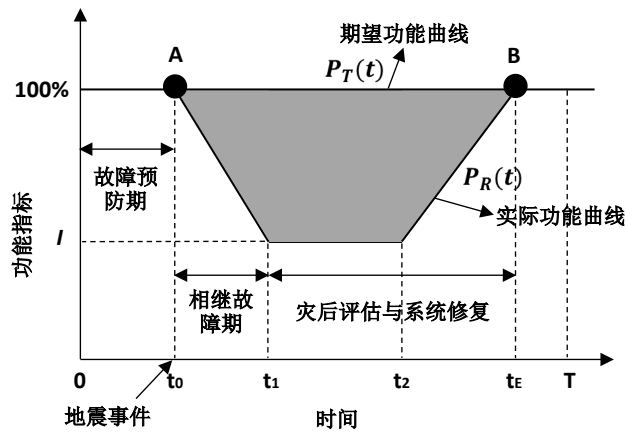


Figure 1. Function curve of power grid under seismic hazards
图 1. 电网在地震灾害下的功能变化曲线

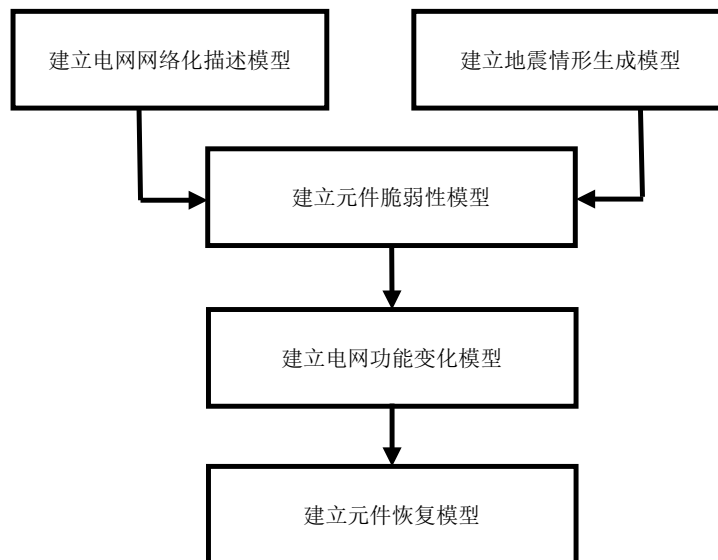


Figure 2. Framework of power grid resilience assessment under seismic hazards
图 2. 电网地震弹性评估框架

同时，建立地震情形生成模型，确定地震的震级与震中位置，引入地震动衰减方程估算电网元件所在位置处地震动强度值(如峰值地震加速度)。然后根据电网元件所处位置的地震动强度及其建筑属性，估算电网元件的脆弱性，即元件破坏程度大于或等于某个临界状态的概率。接着根据电网元件的损坏状况，运用电网运行机理模型，计算电网功能指标的变化过程。其后建立电网元件的恢复模型，估算电网元件在损坏后恢复到正常性能状态所需的时间。最后综合上述五个模型计算电网在地震灾害下的弹性，并设计抗震策略，改进与优化电网弹性。

2.1. 建立电网络络化描述

南方电网主要覆盖中国南部五省区(广东、广西、云南、贵州和海南)，供电面积 100 万平方公里，供电人口 2.3 亿人，供电客户 7961 万户，东西跨度近 2000 公里，截至 2016 年底，全网总装机容量 2.9 亿千瓦，输电线路总长度 21 万公里[17]。

通过对 2015 年南方电网规划地理接线图进行分析,统计得到整个南方电网有包括火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂在内的共计 65 个发电站,同时有包括 500 KV 变电站、500 KV 开关站、200 KV 变电站和换流站在内的共计 129 个传输节点,并由 238 条输电线路共同连接起来,我们将发电站、变电站和换流站等抽象为节点,将输电线路抽象为线,得到其地理拓扑结构图如图 3 所示。

2.2. 建立地震情形生成模型

为了评估电网在地震灾害下的弹性,需要首先建立地震情形生成模型,得到各个电网元件所处位置的地震动强度值,以评估元件受损情况。目前主要存在三种地震情形建模方法:基于地震烈度区划图的方法、基于历史或具体假定地震情形的方法,以及基于蒙特卡洛仿真的方法。基于地震烈度区划图的方法直接根据地震烈度区划图获得具体电网设施所在位置的地震动强度值,是最早被国内外学者所采用的方法。然而,这种方法得到的某个具体位置的地震动强度是基于周围所有可能地震情形进行加权平均的结果,适用于对单个电网设施进行地震风险分析,而不能反映不同设施震动强度的关联性,无法对电网进行准确的系统性分析。基于历史或具体假定地震情形的方法直接采用历史或假定的地震数据得到具体电网设施所在位置的地震动强度。然而,同一震源处再次发生地震的概率较低,基于历史或具体假定地震情形的方法所得到的结果对于应对未来可能发生地震的价值有限,于是更多的研究人员采用了基于蒙特卡洛仿真的地震情形生成方法(也是本文所采用的方法)。

基于蒙特卡洛仿真的方法根据历史地震数据,结合地震发生与扩散机理,仿真得到一系列可能发生的地震情形。具体过程是首先确定各条地震带上是否有地震发生,假如有地震发生的话,根据古登堡-里克特定律[18]确定该地震震级,同时在该地震带范围内随机确定震中的位置,最后根据地震动衰减方程计算出该地震情形的地震动强度分布,由此可以得到各个电网元件所处位置处的地震动强度,结合元件脆弱性曲线可确定其达到不同损坏程度的概率。

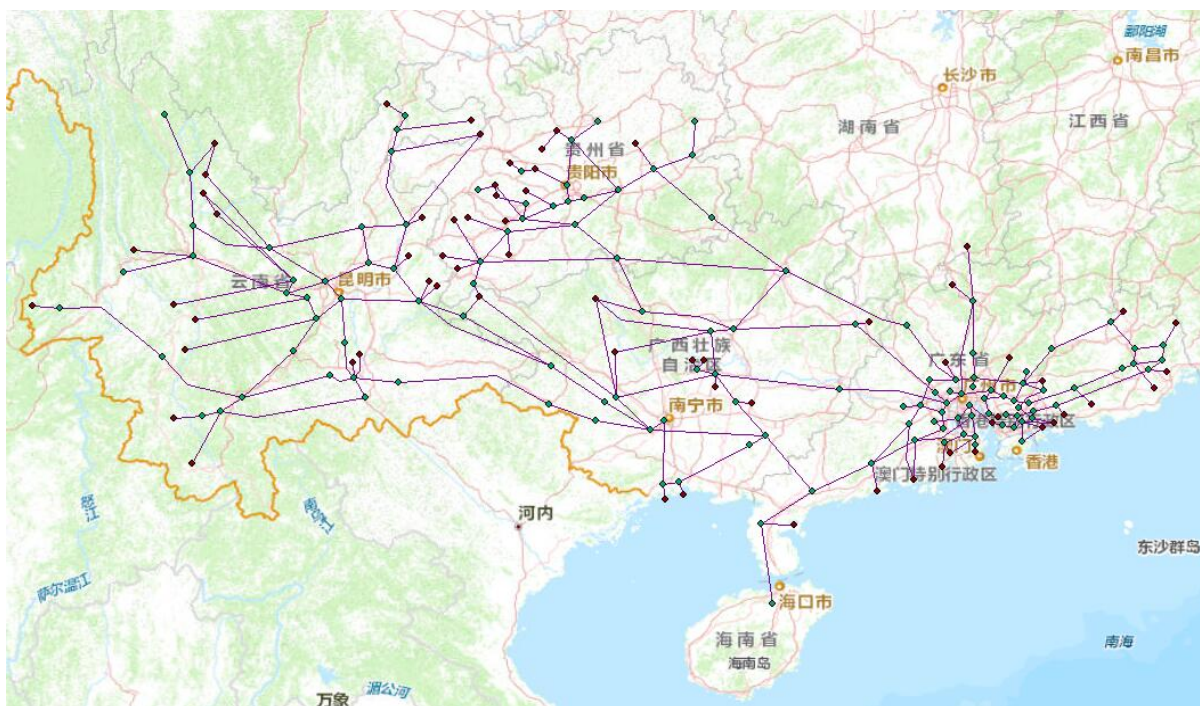


Figure 3. Geographical topology diagram of Southern Power Grid

图 3. 南方电网地理拓扑结构图

古登堡 - 里克特定律是地震活动服从的一般规律, 其具体表现形式为 $N = 10^{a-b*M}$, M 指的是震级, N 为震级大于或等于 M 的地震次数, a 指地震活跃水平, b 指地震发生频率与震级分布关系的斜率。古登堡 - 里克特定律描述了一个复发周期内地震的活动规律。通过对中国自公元前 780 年至今的 4.5 级以上的历史地震数据进行分析, 采用最小二乘回归算法可以计算得到每一条地震带上的 a 和 b 的值。进而可以基于蒙特卡洛仿真模拟产生地震情形。一次典型的地震情形产生过程如下:

1) 对于每一条地震带及区间内的每一年, 产生一个在 0 到 1 之间的符合均匀分布的随机数 P_{random} ;

2) 若该随机数小于地震年发生概率 P_{min} , 且大于地震年发生概率 P_{max} , 则表明这一年在这个地震源区有地震发生。其中 P_{min} 是指发生震级大于给定最小震级 M_{min} 的地震的概率, P_{max} 是指发生震级小于给定最大震级 M_{max} 的地震的概率, 它们可以根据一个泊松分布模型得到[19], 具体过程如下:

$$N_{\text{min}} = 10^{a-b*M_{\text{min}}} \quad (2)$$

$$N_{\text{max}} = 10^{a-b*M_{\text{max}}} \quad (3)$$

$$P_{\text{min}} = 1 - \exp^{-N_{\text{min}}} \quad (4)$$

$$P_{\text{max}} = 1 - \exp^{-N_{\text{max}}} \quad (5)$$

3) 当一场地震随机产生的时候, 其震级 M 可以通过随机数 P_{random} 确定, 计算公式如下:

$$N_{\text{random}} = -\ln(1 - P_{\text{random}}) \quad (6)$$

$$M = \frac{a - \log(N_{\text{random}})}{b} \quad (7)$$

4) 每一条地震带上产生地震的震中位置由随机产生的经纬度来确定, 方法是在每一条地震带的经纬度范围内通过均匀分布随机产生两个随机数来表示该地震情形的经度和纬度, 这里假设在同一条地震带上任意地点发生地震的概率是相等的;

5) 基于以上步骤得到的地震情形的震级和震中位置, 可以确定该地震情形的地震动强度分布。采用峰值地震加速度来衡量震中周围各个地点的地震动强度, 此处采用 Toro 的地震动衰减方程来计算各个地点的峰值地震动加速度 PGA [20]:

$$\begin{aligned} \ln(\overline{\text{PGA}}) = & 2.20 + 0.81 * (M - 6.0) - 1.27 * \ln(\sqrt{R^2 + 9.3^2}) \\ & + 0.11 * \max\left[\ln\left(\frac{R}{100}\right), 0.0\right] - 0.0021 * \sqrt{R^2 + 9.3^2} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: M 表示该地震情形的震级, R 表示某一地点与该地震震中间的距离。

南方电网主要受到西南地区和东南沿海地区八条地震带的影响, 它们分别是: 喜马拉雅山地震带、康定 - 甘孜地震带、金沙江 - 元江地震带、怒江 - 澜沧江地震带、安宁河谷地震带、武都 - 马边地震带、滇东地震带和东南沿海地震带。其余地震带都与南方电网分布区域相距甚远, 影响微乎其微, 因而在此不作考虑。在每一条地震带上重复上述地震情形产生过程 10,000 次, 针对南方电网在八条地震带上共计产生了 53,685 种地震情形, 震级分布在 4.5 级到 8.5 级之间。

2.3. 建立元件脆弱性模型

对电网进行地震弹性分析的前提是进行电网元件脆弱性建模, 其目的是为了得到元件在给定地震动强度下损坏程度大于或等于某一极限损坏程度的概率。地震灾害下元件的损坏程度一般分为四种: 轻度损坏、中度损坏、重度损坏和完全损坏。元件脆弱性可以用累积对数正态分布函数描述[21]:

$$P_i(D \geq d_i | I = x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_i s} \exp\left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(s) - \lambda_i}{\xi_i} \right\}^2\right] ds \quad (9)$$

式中： $i = 1, 2, 3, 4$ 表示元件四种极限损坏状态的序号； d_i 表示四种极限损坏程度； D 是符合零一均匀分布的随机变量； $I = x$ 表示元件所处位置的地震动强度为 x 。 λ_i 、 ξ_i 是四种极限损坏程度对应脆弱性曲线的对数均值与标准差。电网元件在四种极限损坏状态下 λ_i 、 ξ_i 的值，如表 1 所示。

根据表 1 中脆弱性曲线的对数均值与标准差结合公式(9)可绘制出电网元件在四种不同损坏极限状态下的地震脆弱性曲线，如图 4 所示。基于元件的地震脆弱性曲线，给定元件所在位置的地震动强度，可得到元件损坏程度分别大于或等于轻度、中度、重度及完全损坏的概率，进而采用蒙特卡洛仿真就可以得到系统元件损坏程度的具体情形。这里我们只考虑了变电站和换流站被破坏的情况，未考虑输电线路破坏的情况，因为连接输电线路的高压电塔抗震级别很高，因此未作考虑。

2.4. 建立电网功能变化模型

电网在地震事件下的功能变化模型如图 1 表示，其中横坐标表示时间，纵坐标表示电网功能指标。正常情况下，电网功能指标维持在额定值 100%，直到遇到一个 t_0 时刻的地震事件，由于电网元件的相互作用，可能发生连锁故障，直达到 t_1 时刻的稳定状态；之后进行系统修复，修复后的系统功能可能与事件之前一样，也可能比事件前更好或更坏，但是都可以用目标功能曲线 $P_T(t)$ 与实际功能曲线 $P_R(t)$ 来反映。为了得到电网实际功能变化曲线，需要首先选择衡量电网功能的指标，指标主要有网络效率、最大团尺寸和连通度等，它们的定义和量化公式分别为：

Table 1. Mean and standard deviation of fragility curve of power grid component under four damage states
表 1. 电网元件四种极限损坏程度对应脆弱性曲线的对数均值与标准差

损坏程度	对数均值 λ_i (g)	标准偏差 ξ_i (g)
轻度损坏	0.11	0.50
中度损坏	0.15	0.45
重度损坏	0.20	0.35
完全损坏	0.47	0.40

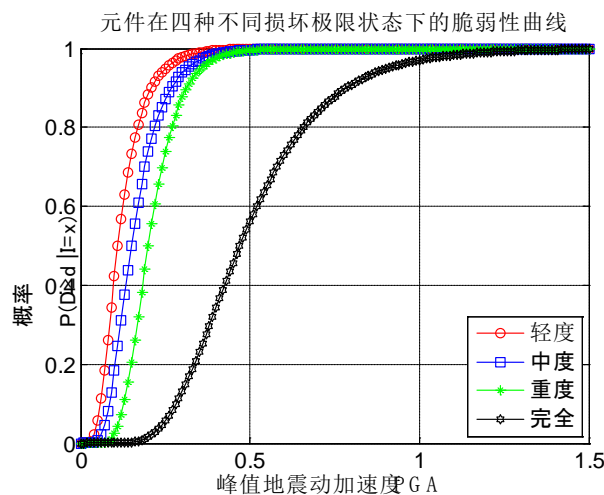


Figure 4. Fragility curve of power grid component under seismic hazards

图 4. 电网元件地震脆弱性曲线

1) 网络效率 E , 被定义为任意两节点间最短路径长度的标准化值, 其量化公式如下:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (10)$$

式中: N 为电网中总的节点数量; d_{ij} 为网络中任意两个节点 i 和 j 之间的最短路径数。

2) 最大团尺寸 LCS , 为最大互连节点数量与网络总节点数的比值。

$$LCS = \frac{N_l}{N} \quad (11)$$

式中: N_l 为网络所有最大连通子图中节点数量最大的值; N 为网络总节点数。

3) 连通度 CL , 为每个负载节点连接的发电站节点占所有发电站节点比例的均值。

$$CL = \left\langle \frac{N_g^i}{N_g} \right\rangle \quad (12)$$

式中: N_g^i 为与节点 i 连通的所有发电站节点数量; N_g 为发电站节点总数量。

选择确定电网功能指标之后, 接着需要建模电网在初始故障状态(采用元件脆弱性模型模拟得到)下的响应模型, 得到电网在灾后稳态下的元件故障状态, 进而可以计算电网在 t_1 时刻的功能指标值。电网故障响应模型主要有纯拓扑模型、虚拟流模型和直流潮流模型三种。纯拓扑模型将发电站、变电站及负载视为节点, 连接这些节点的输电线路视为边, 不考虑电网中运行的流量属性, 而虚拟流模型和直流潮流模型需要考虑电网中的流量及容量属性。基于简单化考虑以及电网中实际的流量数据不断变化且难以统计得到, 这里我们采用纯拓扑模型对电网在地震灾害下的性能进行评估。

2.5. 建立元件恢复模型

电网元件在损坏后性能恢复到正常状态所需的时间一般均服从正态分布, 元件在四种极限损坏状态下性能恢复到正常状态所需时间的平均值和标准偏差, 如表 2 所示。由此可得到电网元件在不同损坏状态下性能恢复到正常状态各自所需的时间, 进而可绘制出电网功能变化曲线。

根据表 2 中性能恢复时间函数表中的时间均值与标准差结合正态分布函数可绘制出电网元件在四种不同损坏极限状态下的性能恢复曲线, 如图 5 所示。

3. 仿真结果

在上述八条地震带上分别仿真 10,000 次, 共计得到 53,685 种地震情形, 分别计算在每一种地震情形下电网元件(即南方电网高压变电站、换流站、开关站等)所处位置的地震动强度, 此处是峰值地震动加速度 PGA ; 继而根据元件脆弱性曲线可得到元件损坏程度分别大于或等于轻度、中度、重度以及完全损坏的概率, 采用蒙特卡洛仿真确定各个电网元件在该种地震情形下的损坏程度; 结合电网故障响应模型, 确定电网震后稳态下所有电网元件的故障状态, 接着采用网络效率、最大团尺寸和连通度等指标来量化计算电网在地震灾害下功能变化; 由元件性能恢复时间函数表结合正态分布函数可得到电网元件在不同损坏状态下性能恢复到正常状态所需的时间, 进而可绘制出电网在特定地震情形下的功能变化曲线; 最后根据电网功能变化曲线和弹性公式(公式(1))即可计算出南方电网在该种地震情形下的弹性, 计算出所有地震情形下的弹性求取均值。

为了对南方电网弹性进行优化并降低其在地震灾害下的损失, 可对电网元件进行加固, 提高其抗震性能, 降低其在大地震下的损坏概率及损坏程度。电网元件加固后, 其地震脆弱性曲线将右移, 在相同震中同等震级的地震破坏下, 变电站损坏程度超越各个极限损坏程度的概率都将降低, 进而元件脆弱性

Table 2. Restoration time function of power grid component
表 2. 电网元件性能恢复时间函数

损坏程度	平均值 Mean (天)	偏差 β (天)
轻度损坏	1.0	0.5
中度损坏	3.0	1.5
重度损坏	7.0	3.5
完全损坏	30.0	15.0

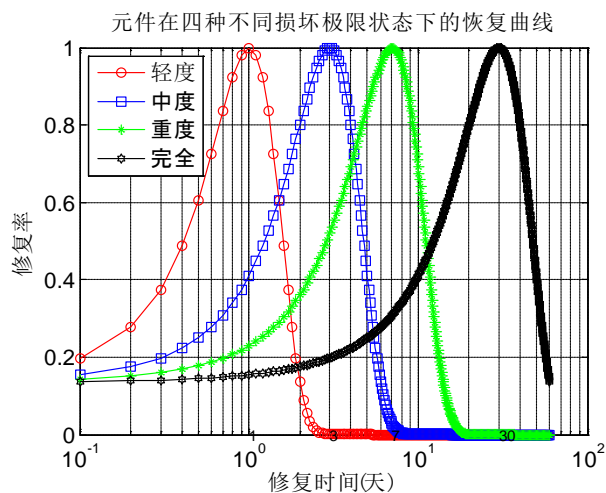


Figure 5. Restoration curve of power grid component after seismic hazards

图 5. 电网元件震后性能恢复曲线

会降低，电网性能反应曲线将向上移动，电网震后性能恢复速度将提高，弹性会增加，电网所遭受的损失随之减小。图 6 是基于连通度的南方电网性能恢复曲线，我们可以看到，随着加固措施的采取，电网元件抗震强度的提升，南方电网震后性能恢复速度不断提高，这可以印证对电网元件采取加固措施的有效性。同时我们计算了南方电网在不同震级地震灾害下的弹性，如图 7 所示，可以看到随着地震震级的增加，南方电网弹性不断下降，而在采取了加固措施使得电网元件抗震强度得到不同程度的提升之后，在同等震级的地震灾害下南方电网的地震弹性均有明显改善。美国国家标准与技术研究院发布的电网白皮书中曾提到[22]，美国国家电网的可靠性为 99.97%，剩余 0.03% 的不可靠性每年都会造成 1500 亿美元的经济损失，美国电网总里程约为 30 万公里，中国南方电网总里程也有 21 万公里，尽管中美两国电网存在各种差异，可靠性与弹性指标也存在差异，但依然可以肯定的是对南方电网在地震灾害下的弹性很微小的改善，都可以产生巨大的经济效益。

4. 结语

近年来发生的历次大地震都对电网造成巨大破坏，这表明地震已经成为现代电网安全稳定运行的最大威胁之一。因此，开展电网的抗震研究，制定完善的震前预案，建立有效的应急响应机制，保障灾后电力供给是当前电网一个刻不容缓的任务和挑战。本文提出了一个电网在地震灾害下的弹性分析框架，重点介绍了地震情形产生方法和电网地震弹性分析方法，并以南方电网为例从弹性的角度分析了电网在地震灾害下的性能，同时对电网元件采取加固措施前后地震灾害下的电网性能恢复速度和弹性进行了对比，验证了电网弹性优化措施的有效性。通过上述研究同时也发现，本文存在如下尚待进一步研究的问题

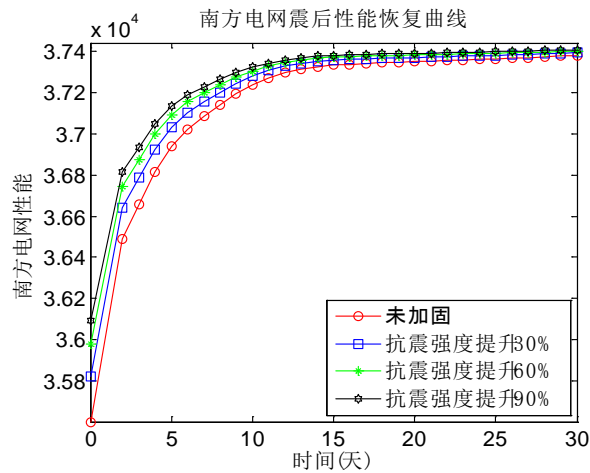


Figure 6. Restoration curve of Southern Power Grid after seismic hazards

图 6. 南方电网震后性能恢复曲线

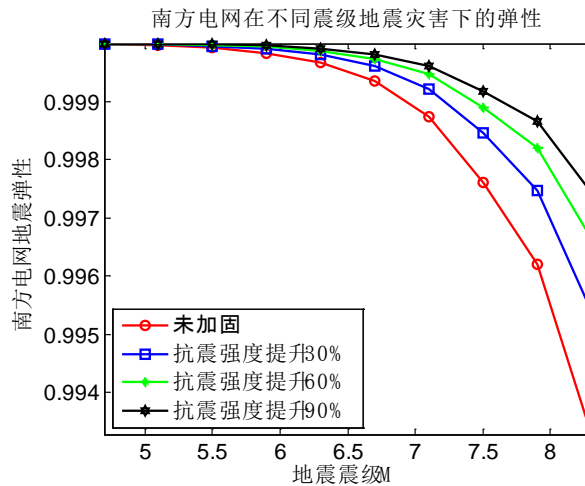


Figure 7. Resilience of Southern Power Grid under seismic hazards with different magnitude

图 7. 南方电网在不同震级地震灾害下的弹性

题：第一，有待发现并验证更多的电网地震弹性优化措施；第二，仅研究了电网的地震弹性，未考虑与其关联的基础设施间的相互影响，有待进一步研究；第三，在未来的研究中可以进一步考虑其它自然灾害以及人为破坏对电网的影响。

参考文献 (References)

- [1] 梁志峰, 葛睿, 董昱, 等. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [2] 孙建锋, 葛睿, 郑力, 等. 2010 年国家电网安全运行情况分析[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.
- [3] 刘爱文, 帅向华, 吕红山, 等. 鲁甸地震生命线工程震害特点及应急抢修[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(3): 359-367.
- [4] 张子引, 赵彪, 曹伟伟, 等. 四川汶川 8.0 级地震电网受灾情况调研与初步分析[J]. 电力技术经济, 2008, 20(4): 1-4.
- [5] 王如祥. “5.3”包头地震中的电网问题[J]. 电网技术, 1997(4): 52-53.

- [6] 杨少勇, 赵建国. 电力系统地震灾害预防技术综述[J]. 电网技术, 2010, 34(321): 57-63.
- [7] Poljansek, K., Bono, F. and Gutierrez, E. (2012) Seismic Risk Assessment of Interdependent Critical Infrastructure Systems: The Case of European Gas and Electricity Networks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**, 61-79. <https://doi.org/10.1002/eqe.1118>
- [8] Ang, H.S., Pires, J.A. and Villaverde, R. (1996) A Model for the Seismic Reliability Assessment of Electric Power Transmission Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, **51**, 7-22.
- [9] Vanzi, I. (1996) Seismic Reliability of Electric Power Networks: Methodology and Application. *Structural Safety*, **18**, 311-327.
- [10] Zhigang, W.U., Chang, L. and Shi, S. (2006) Reliability Analysis of Power Systems under Disaster Impacts.
- [11] Raschke, M., Bilis, E. and Kröger, W. (2011) Vulnerability of the Swiss Electric Power Transmission Grid against Natural Hazards. *International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*. 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, 1407-1414. <https://doi.org/10.1201/b11332-211>
- [12] Cavalieri, F., Franchin, P., Cortés, J.A.M.B., et al. (2014) Models for Seismic Vulnerability Analysis of Power Networks: Comparative Assessment. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **29**, 590-607.
- [13] Faturechi, R. and Miller-Hooks, E. (2015) Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review. *Journal of Infrastructure Systems*, **21**, Article ID: 04014025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000212)
- [14] Shinozuka, M., Dong, X., Chen, T.C., et al. (2007) Seismic Performance of Electric Transmission Network under Component Failures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **36**, 227-244. <https://doi.org/10.1002/eqe.627>
- [15] Espinoza, S., Panteli, M., Mancarella, P., et al. (2016) Multi-Phase Assessment and Adaptation of Power Systems Resilience to Natural Hazards. *Electric Power Systems Research*, **136**, 352-361. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.019>
- [16] Ouyang, M. and Dueñas-Osorio, L. (2014) Multi-Dimensional Hurricane Resilience Assessment of Electric Power Systems. *Structural Safety*, **48**, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.01.001>
- [17] 尚春. 特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 35-37.
- [18] Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1944) Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **34**, 185-188.
- [19] Crowley, H. and Bommer, J.J. (2006) Modelling Seismic Hazard in Earthquake Loss Models with Spatially Distributed Exposure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**, 249-273. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9009-y>
- [20] Toro, G.R., Abrahamson, N.A. and Schneider, J.F. (1997) Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters*, **68**, 41-57. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.41>
- [21] Adachi, T. and Ellingwood, B.R. (2010) Comparative Assessment of Civil Infrastructure Network Performance under Probabilistic and Scenario Earthquakes. *Journal of Infrastructure Systems*, **16**, 1-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2010\)16:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2010)16:1(1))
- [22] National Institute of Standards and Technology (2010) White paper: Energy Technologies to Enable a Smart Grid. https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/05/09/energy_wp_10_28_10.pdf

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mos@hanspub.org