

齐四清,任春雷.震后紧急供电的电力网络安全检测研究[J].地震工程学报,2019,41(2):513-519.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.513

QI Siqing,REN Chunlei.Power Network Security Detection for a Post-Earthquake Emergency Power Supply[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(2):513-519.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.513

震后紧急供电的电力网络安全检测研究

齐四清,任春雷

(国网内蒙古东部电力有限公司信息通信分公司,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:当前震后紧急供电安全检测方法忽略了电网节点的三相电流不对称问题,未计算电力网络节点功率、支路电流及网损,导致电力网络进行节点连通安全检测准确率低。据此提出震后紧急供电的电力网络安全检测方法,根据连通度矩阵电力网络节点的工作参数,电力网络潮流计算不同节点的电压向量。利用快速耦合法优化牛顿拉夫逊法的计算速度,求出节点功率、支路电流及网损数值。以所构建的电力网络节点连通安全检测模型为基础,采用蒙特卡洛方法完成震后紧急供电的电力网络安全检测。经实验证明,所提方法可有效检测震后紧急供电的电力网络节点安全性,当震动加速度分别为 0.05 gal、0.20 gal、0.80 gal 时,实验对象连通安全检测结果分别为较高、中等和极低状态,与实际结果均一致,说明所提方法能准确检测电力网络节点连通的安全性。

关键词:震后;紧急供电;电力网络;安全检测;潮流计算;快速解耦法

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0513-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.513

Power Network Security Detection for a Post-Earthquake Emergency Power Supply

QI Siqing, REN Chunlei

(Information & Telecommunication Company, State Grid East Inner Mongolia Electric
Power Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: Current safety detection methods for emergency power supply following an earthquake generally ignore the three-phase current asymmetry of the power grid node; nor are node power of the network, branch current, and network loss calculated. This results in low accuracy in node network safety detection. Based on this premise, a power network security detection method for emergency power supply following earthquakes is proposed. According to the operation parameters of the connectivity matrix power network node, the voltage vector of different nodes was obtained using the power flow calculation. The fast-coupled method was used to optimize the calculation speed of the Newton-Raphson method, and node power, branch current, and network loss values were calculated. Based on the constructed safety detection model of the power network node connectivity, the Monte Carlo method was used to accomplish the power network security detection for emergency power supply following an earthquake. The experimental results showed

收稿日期:2018-08-13

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2014MS0616)

第一作者简介:齐四清(1966-),男,内蒙古集宁人,高级工程师,主要研究方向为自动控制,网络安全。E-mail:18686055610@163.com。

that the proposed method could effectively detect the safety of power network nodes for post-earthquake emergency power supply. When the vibration acceleration was 0.05 gal, 0.20 gal, and 0.80 gal, the safety test results of the experimental objects were high, medium, and extreme, respectively, which was consistent with the actual results, and indicated that the proposed method can also accurately detect the security of the connectivity of power network nodes.

Keywords: post-earthquake; emergency power supply; power network; safety detection; power flow calculation; fast decoupled method

0 引言

在能源供应系统中电力网络是极为关键的部分,是现代社会生活中不可或缺的能源保障。由于电力能源具有储量小、暂态短、与国民民生经济关系紧密等特性^[1]。因此,电力网络若发生故障,会给国家、人民带来巨大损失。地震作为一种多发灾害,对电力网络的破坏性巨大,会造成电力网络的瘫痪,在造成直接经济损失的同时,还会给震后救灾工作的开展带来阻碍,其间接损失更为惨重。因此研究震后紧急供电的电力网络安全检测方法,恢复震后灾区电力供给,保障电力网络安全具有极为重要的经济意义和社会意义^[2]。

传统电力网络安全检测方法中存在较多的问题,例如文献[3]结合 Spark 大数据计算框架和 PSO 优化神经网络算法的优点,提出一种基于 Spark 内存计算框架的并行 PSO 优化神经网络算法,此算法能够准确地预测电力网络功能的安全性,对电力网络节点连通的安全性检测效果不好,检测结果不全面。文献[4]融合小波变换和小波包检测电力网络安全性,未考虑震后供电环境,检测过程中进行多次迭代,运算速度较慢、检测效率差。文献[5]为提高电力网络的友好性以及高效率的检测电力网络安全性,将紧急负荷调节作为电力网络安全稳定紧急控制手段,该方法只适用于电力网络节点连通的安全检测,忽略了电力网络节点的安全性,具有一定的局限性。文献[6]研究的电网保护恢复机制,采用网状网组网方式提高电力网络生存能力,该种机制同样存在检测结果片面性的问题。

针对上述文献中存在的问题,提出震后紧急供电的电力网络安全检测方法,首先利用连通度矩阵电力网络节点的工作参数,在潮流计算不同节点的电压向量的基础上,通过改进的牛顿法求出节点功率、支路电流及网损数值,将它们作为模型参数,据此采用蒙特卡洛方法完成震后紧急供电的电力网络安全检测。

1 震后紧急供电的电力网络安全检测方法

1.1 电力网络节点的安全检测

电力网络节点发生故障时,会随之带来大量的短路电流,使节点电压发生改变,造成电力网络节点网损问题。

当前应用于配电网的潮流算法可以分为快速耦合法、牛顿拉夫逊法、前推回代法等,根据研究课题的收敛度需求,本文采用牛顿拉夫逊法。为了解决牛顿法初值选取不当造成迭代时间较长的问题,结合快速耦合法提升迭代方程的计算速度。通过连通度矩阵获取电力网络节点的工作参数,通过潮流计算出不同电流节点的电压向量,再将电压向量带入牛顿法中,求出节点功率、支路电流及网损数值。

1.1.1 震后紧急供电的电力网络工作参数获取

工作状态下的全部电力设备在未达到它们额定的电流、电压和频率的幅值及时间内工作,则说明电力网络安全^[7]。检测电力网络节点的安全性时,选取连通度检测方法^[8],将地震对电力网络的损毁当作电力网络正常工作状态中的一种干扰,以电力网络潮流方程的 Taylor 级数展开式为起点,推导连通度矩阵,通过提升节点功率对断线影响进行仿真,利用地震灾害的仿真以及连通度安全检测运算获取震后紧急供电的电力网络工作参数,为判断网络是否安全提供基础。

1.1.2 不同电流节点电压向量的潮流计算

发电厂、变电站、线路等元件共同构成了电力运行的有源网络^[9],从宏观角度出发,可将这种有源网络当作由若干节点与支路组成,且全部支路参数均为常数的线性网络。在此网络中,以节点电压为关键变量,在电力网络内的电源、负载或个别支路状态有所改变的情况下,节点电压都会随之发生改变。一般情况下,电力网络的结构与参数都是已知的,只是不同节点运行参数已知量各有不同,本文采用电力网络潮流计算不同节点的电压向量^[10]。

已知节点功率潮流公式如下:

$$W_i + M_i = U_i I_i^* = U_i \sum_{\epsilon_{ji}} O_{ij}^* U_j \quad (1)$$

式中:节点 i 的有功功率及无功功率分别是 W_i 和 M_i ;节点 i 的复电压、复电流、电压共轭值、电流共轭

$$\left. \begin{aligned} W_i &= U_i \sum_{\epsilon_{ji}} U_j (G_{ij} \cos \mu_{ij} + F_{ij} \sin \mu_{ij}) \\ M_i &= U_i \sum_{\epsilon_{ji}} U_j (G_{ij} \sin \mu_{ij} + F_{ij} \cos \mu_{ij}) \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: G_{ij} 、 F_{ij} 和 μ_{ij} 分别表示导纳矩阵的实部、导纳矩阵的虚部和节点 i 同节点 j 的相角差。

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_i &= W_i - U_i \sum_{\epsilon_{ji}} U_j (G_{ij} \cos \mu_{ij} + F_{ij} \sin \mu_{ij}) \\ \Delta M_i &= M_i - U_i \sum_{\epsilon_{ji}} U_j (G_{ij} \sin \mu_{ij} + F_{ij} \cos \mu_{ij}) \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: ΔW_i 与 ΔM_i 分别表示节点 i 的有功功率偏差与无功功率偏差。

参考大量文献可知,在对地震安全检测时大多采用 Newton 法对潮流方程运算求解,即在潮流计算过程中采用 New-Raphanson 法,则相应的函数向量机变量分别是 $Y = [\Delta W, \Delta M]$ 和 $X = [\mu, U]$ 。由此能够得到式(3)的矩阵形式,如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ E & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mu \\ \Delta U/U \end{Bmatrix} = [J^0] \begin{Bmatrix} \mu \\ \Delta U/U \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: ΔW 、 ΔM 分别表示有功功率总偏差与无功功率总偏差; $-\begin{bmatrix} H & N \\ E & L \end{bmatrix}$ 、 $[J^0]$ 为雅克比矩阵; H 、 N 、 E 和 L 表示子块; μ 为相角差; $\Delta U/U$ 为总复电压偏差率。以此求出不同电流节点的电压向量及其偏差。

1.1.3 节点功率、支路电流及网损计算

由于采用 Newton 法(牛顿拉夫逊法)进行运算时需进行多次迭代,而每次迭代都会产生新的雅克比矩阵,进而拖慢了运算速度。检测震后紧急供电的电力网络安全时,速度是一种关键的影响因素,因此本文在 Newton 法的基础上,结合快速解耦法提升运算速度^[12]。快速解耦法利用高压电力网络的物理特性解耦电力网络中的有功功率和无功功率,高压电力网络的物理特性为:在输电元件内,电阻大幅低于电抗,从一个节点至另一个节点的有功功率 W_b 由不同节点的电压相位差决定;从一个节点至另一个节点的无功功率 M_b 由不同节点的电压模值差决定,几乎与电压相位差无关。

在高压电力网络物理特性的基础上,不考虑式

值和导纳矩阵共轭值分别是 U_i 、 I_i 、 U_i^* 、 I_i^* 和 O_{ij}^* ;同节点 i 连接的全部节点用 ϵ_{ji} 表示;节点 j 的复电压用 U_j 表示。

将式(1)分解为实部与虚部,得到:

由于节点功率同电压与电流间存在非线性关系^[11],因此用功率偏差公式表示式(2)为:

(4) 雅克比矩阵内的 N 和 M 子块,获取快速解耦法的修正方程式如下:

$$\Delta W = -H \Delta \mu \quad (5)$$

$$\Delta M = -E \Delta U/U \quad (6)$$

式中: $\Delta \mu$ 表示相角差偏差。

高压线路两侧电压的相角差较小,通过式(7)进行描述:

$$\left. \begin{aligned} \cos \mu_{ij} &\approx 1 \\ G_{ij} \sin \mu_{ij} &\ll F_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同网络不同节点无功功率对应的导纳大幅低于节点自导纳的虚部,如下:

$$F_{Li} = M_i/L_i^2 \ll F_{li} \quad (8)$$

式中: $F_{Li} = M_i/L_i^2$ 表示节点无功功率对应的导纳; F_{li} 表示节点自导纳。

基于式(7)、(8),可将式(5)、(6)推导为:

$$\Delta W/U = F' U \Delta \mu \quad (9)$$

$$\Delta W/U = F'' \Delta U \quad (10)$$

式中: U 表示总复电压; ΔU 表示总复电压偏差。

在现实的运算过程内,通过 F' 及 F'' 的差异处理能够获取 FX 法和 XF 法。前文中提到,输电元件内电阻大幅低于电抗,因此选取 XF 法,即运算矩阵 F'' 的过程内不考虑支路电阻 r_{ij} ,根据式(11)、(12)运算系数矩阵内不同元素:

$$F'_{ij} = -\frac{x_{ij}}{x_{ij}^2 + r_{ij}^2}, F'_{ii} = -\sum_{\epsilon_{ji}} F'_{ij} \quad (11)$$

$$F''_{ij} = -\frac{1}{x_{ij}}, F''_{ii} = \sum_{\epsilon_{ji}} \frac{1}{x_{ij}} - f_0 \quad (12)$$

其中: r_{ij} 、 x_{ij} 和 f_0 分别表示支路电阻、支路电抗和支路并联电纳的二分之一。

对式(9)、(10)进行运算能够分别获取节点电压模值和相角的增量,采用式(13)、(14)对获取的结果进行修正:

$$\theta_i^T = \theta_i^{T-1} - \Delta\theta_i^{T-1} \quad (13)$$

$$U_i^T = U_i^{T-1} - \Delta U_i^{T-1} \quad (14)$$

式中: T 表示迭代次数; θ_i 表示相角增量; $\Delta\theta_i$ 表示相角增量偏差。将电压向量通过牛顿法进行计算,得出节点网损得出:

$$k = \sum_T \Delta\theta_i - \theta_i \quad (15)$$

在式(13)、(14)的基础上,再次运算节点的功率和功率偏差,假设获取的结果符合迭代误差的标准,那么迭代完成;若相反,则迭代继续。针对 n 节点网络,假设 WM 节点数量为 r ,那么未知量数量为 $n+r-1$; F' 和 F'' 分别是 $n-1$ 阶方程和 r 阶方程。其计算过程如图1所示。

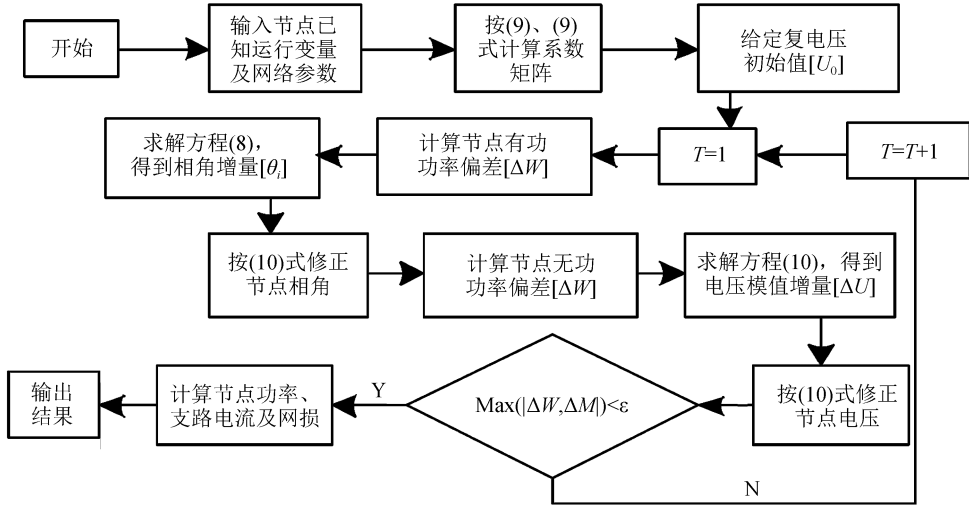


图1 牛顿拉夫逊法计算过程

Fig.1 Calculation process of Newton-Raphson method

1.2 电力网络节点连通的安全检测

构建电力网络节点连通安全检测模型,将电力网络各个节点网损数值带入模型中,将其作为各个网络节点的元件状态参数,从而检测电力网络节点连通安全状态。

1.2.1 电力网络节点连通安全检测模型构建

(1)基本假设

假设电力网络内发电厂、变电站、输电线路等这些网络元件的抗震安全概率为 $0\sim 1$ 间的实数,处于多值状态,不同值间无联系,即元件多态假设:

$$y_i = \begin{cases} y_i \geq k_0 & \text{元件 } i \text{ 有效} \\ y_i < k_0 & \text{元件 } i \text{ 失效} \end{cases} \quad (k \in [0, 1]) \quad (16)$$

式中: y_i 和 k_0 分别表示元件随机数和元件抗震安全概率。

(2)电力网络节点连通安全检测模型的划分

利用式(15),在电力网络基本模型内融入元件的多值状态,能够获取电力网络节点连通安全检测模型,依照模型内点元件与边元件的差异组合,将电力网络节点安全性检测模型划分为:

①点权网络模型:认为发电厂及变电站受地震

损毁,输电线路未受损毁;

②边权网络模型:认为输电线路受地震损毁,发电厂及变电站未受损毁;

③一般赋权网络模型:认为发电厂、变电站和输电线路均受地震损毁,此模型在进行震后紧急供电的电力网络节点安全检测时精度较高^[13]。

1.2.2 电力网络节点连通安全检测

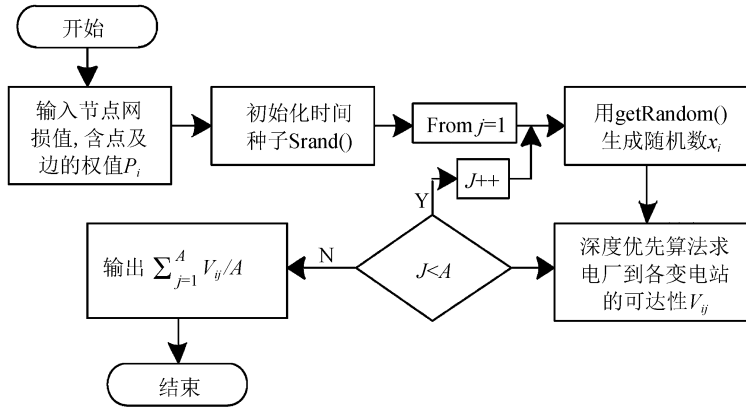
基于电力网络的规模与复杂性,本文采用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法检测电力网络节点连通的安全性,其过程如图2所示。

根据图2可知,流程分为以下五个步骤:

第一步:计算震后紧急供电的电力网络内不同元件(点元件:发电厂、变电站,边元件:输电线路)的抗震安全概率 k_i ;

第二步:将电力网络内不同元件与随机数发生器给出的 $[0, 1]$ 中平均分布的随机数集合相结合,对元件在震后紧急供电中的安全性实施仿真^[14];

第三步:对比不同元件的随机数 y_i 同此元件的安全概率 k_i ,若 $y_i \geq k_i$,则此元件安全,赋值1;若相反则此元件不安全,赋值0;



注:(1)初始化时间种子应该放在循环之外;(2)在深度优先搜索中,当 $x_i \geq p_i$ 时,认为该单元有效,赋值 1;当 $x_i < p_i$ 时,认为该单元失效,赋值 0,据此原则来确定是否放行。(3) j 为递增循环序数; N 为总循环次数。

图 2 电力网络节点连通安全检测流程

Fig.2 Security detection flow chart for power network node connectivity

第四步:根据第三步的结论,利用电力网络节点连通安全检测模型震后紧急供电的电力网络的连通性,也就是源点至网络内不同节点的可达性 V_{ij} :若连通则标“1”,反之则标“0”。在 V_{ij} 内, $i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$, 电力网络内变电站编号为 a-s, 仿真次数为 A 。

第五步:再次进行上一步,当多次仿真后能够满足工程条件的精度时,用 $\sum_{j=1}^A C_{ij} / A$ 表示电力网络内发电厂与第 i 变电站间的连通安全性^[15]。由此完成震后紧急供电的电力网络安全检测研究。

2 实验分析

以我国某区域的电力网络为实验对象,采用本文提出的震后紧急供电的电力网络安全检测方法,对该电力网络受地震作用后紧急供电状态下的安全性进行检测,以验证本文方法的有效性。

实验对象包括发电厂 1 个、变电站 4 个。网络模型如图 3 所示,其中 1、2、3 节点表示有功功率及无功功率节点,4 节点表示有功功率及复电压节点,5 节点表示平衡节点。表 1 和表 2 中描述的是以 100 mW、200 kV 为标准的节点初始标定值以及网络参数。

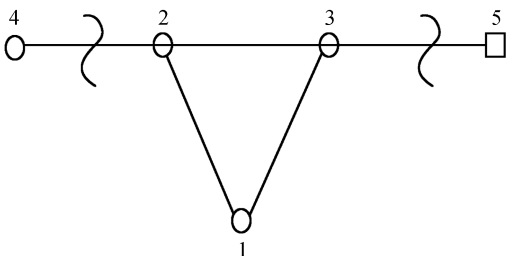


图 3 电力网络检测模型

Fig.3 Power network detection model

表 1 节点负荷值

Table 1 Value of nodal load

节点	有功功率	无功功率
1(1)	-1.50	-0.70
2(1)	-1.90	-0.90
3(1)	-3.60	-1.20
4(2)	4.90	0.95
5(s)	-	0.95

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters

支路	1-2	1-3	2-3	2-4	3-5
电阻	0.03	0.09	0.07	0.00	0.00
电抗	0.14	0.24	0.29	0.01	0.02
支路并联电纳的二分之一	0.14	0.00	0.14	-	-
变比	-	-	-	1.04	1.04

利用 Newton 法,设置迭代功率偏差是 0.000 01,进行多次迭代运算后,获取实验对象工作状态正常时的运行参数,用表 3 和表 4 进行描述。

假定受地震作用后不同节点的发电量及负荷均出现一定程度的下落,仿真电力网络的破坏情况时采用 Monte Carlo 方法。通过仿真电力网络的破坏情况获取震后节点 2 同节点 3 间线路有所损坏,无法进行连通。采用连通度检测方法对实验对象实施

表 3 节点电压、负荷值

Table 3 Nodal voltage and nodal load

节点	复电压	相角差	有功功率	无功功率
1	0.851	-0.072	-1.500	-0.700
2	1.066	0.200	-1.900	-1.200
3	1.025	-0.063	-3.600	-1.200
4	1.039	0.370	4.900	1.702
5	1.039	0.000	2.460	2.188

表4 线路负荷值

Table 4 Value of line load

支路	1-2	1-3	2-3	2-4
$i-j$ 有功功率	-1.355	-0.122	1.304	-4.899
$i-j$ 无功功率	-0.308	-0.379	-0.133	-1.317
$j-i$ 有功功率	1.473	0.145	-1.166	4.890 0
$j-i$ 无功功率	-0.233	0.460	0.192	1.702
复电流	1.605	0.36	1.07	4.914

安全检测,获取震后受到损毁的电力网络运行情况参数,用表5进行描述。

对表5进行检测能够得到,震后受损后不同次数下5个节点的复电压以及相角增量情况,进而获取总体电力网络运行参数情况,说明本文方法可对震后紧急供电的电力网络节点安全状态进行有效检测。

实验依照文章2.2.1小节中介绍的电力网络节点连通安全检测模型中的多态一般赋权网络模型,采用Win32 Console Application程序,利用蒙特卡

洛算法进行实验对象的连通安全检测,结果如表6所示。

表5 震后受损的电力网络运行参数

Table 5 Operation parameters of damaged power network after earthquake

次数		节点				
		1	2	3	4	5
0	复电压	0.807	1.076	1.044	1.039	1.039
	相角增量	-0.026	0.210	-0.044	0.200	0.000
1	复电压	0.821	1.074	1.034	1.048	1.039
	相角增量	-0.103	0.233	-0.040	0.256	0.000
2	复电压	0.837	1.074	1.019	1.048	1.039
	相角增量	-0.106	0.233	-0.024	0.256	0.000
3	复电压	0.852	1.074	1.006	1.048	1.039
	相角增量	-0.123	0.233	-0.003	0.256	0.000
4	复电压	0.851	1.073	1.006	1.048	1.039
	相角增量	-0.121	0.230	-0.003	0.256	0.000
5	复电压	0.859	1.070	1.000	1.048	1.039
	相角增量	-0.130	0.221	0.004	0.256	0.000

表6 电力网络节点连通安全检测结果

Table 6 Security detection results for power network node connectivity

变电站排序 设防烈度	1 Ⅷ	2 Ⅷ	3 Ⅶ	4 Ⅶ	安全平均值	与实际情况是否一致
0.05g	0.988	0.977	0.988	0.988	0.985	一致
0.10g	0.987	0.865	0.875	0.936	0.916	一致
0.20g	0.928	0.471	0.406	0.415	0.555	一致
0.40g	0.673	0.172	0.091	0.146	0.271	一致
0.80g	0.233	0.021	0.003	0.010	0.067	一致

对表6进行检测能够得到,在地震动加速度设定为0.05g的条件下,实验对象的4个变电站的平均连通安全值为0.985,实验对象连通安全性最高;地震动加速度设定为0.20g时,平均连通安全值为0.555,实验对象连通安全性中等;地震动加速度设定为0.80g时,平均连通安全值为0.067,实验对象连通安全性极低,基本处于瘫痪状态。实验结果与实际结果均一致,表明本文方法能够准确地对电力网络节点连通安全进行检测。

3 结论

作为体现网络运行能力关键指标的网络安全是检测震后生命线系统工作情况的主要方法。我国处于地震多发地带,我国近些年地震资料显示,在多数情况下,地震会造成电力网络受到不同程度的损毁,不仅影响了人们的正常生活与生产,更导致震后抗震救灾工作无法有效进行。因此,研究一种高效的准确的电力网络安全检测方法势在必行。本文提出震后紧急供电的电力网络安全检测方法,以电力网络潮流方程的Taylor级数展开式为起点,推导连通

度矩阵,根据不同节点运行参数已知量各有不同,采用电力网络潮流计算不同节点的电压向量。在Newton法的基础上,结合快速解耦法提升运算速度,求出节点功率、支路电流及网损数值。构建电力网络节点连通安全检测模型,将电力网络各个节点网损数值带入模型中,将其作为各个网络节点的元件状态参数,从而检测电力网络节点连通安全状态。实验结果表明,本文方法可对震后紧急供电的电力网络节点安全状态进行有效检测;地震动加速度分别为0.05g、0.20g、0.80g时,实验对象连通安全检测结果分别为较高、中等和极低状态,且实验结果与实际结果相同,说明本文方法能够准确地对电力网络节点连通安全进行检测。

鉴于论文篇幅所限,有关详细的技术环节恕这里没有能做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中错误难免,望给予批评指正。

参考文献(References)

- [1] 鲁宗相,黄瀚,单葆国,等.高比例可再生能源电力系统结构形态

- 演化及电力预测展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):12-18.
- LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological Evolution Model and Power Forecasting Prospect of Future Electric Power Systems with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):12-18.
- [2] 李兆伟,刘福锁,崔晓丹,等.计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(1):35-40.
- LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate Control Study for Dynamic Division and Load Shedding Considering Electrical Security Accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1):35-40.
- [3] 金鑫,李龙威,苏国华,等.基于 Spark 框架和 PSO 优化算法的电力通信网络安全态势预测[J].计算机科学,2017,44(增刊1):366-371.
- JIN Xin, LI Longwei, SU Guohua, et al. Prediction about Network Security Situation of Electric Power Telecommunication Based on Spark Framework and PSO Algorithm[J]. Computer Science, 2017, 44(Suppl):366-371.
- [4] 杨建林,房岭峰,余涛,等.考虑网络安全约束的电力直接交易仿真方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(7):61-67.
- YANG Jianlin, FANG Lingfeng, YU Tao, et al. Simulation Approach for Direct Power Trading Considering Network Security Constraints[J]. , 2017, 29(7):61-67.
- [5] 李碧君,侯玉强.紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(11):104-110.
- LI Bijun, HOU Yuqiang. Research of Emergency Load Regulation for Security and Stability Control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11):104-110.
- [6] 李建明,刘媛,沈哈阳,等.基于 2 M 业务的电网保护恢复机制研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(16):106-111.
- LI Jianming, LIU Yuan, SHEN Hanyang, et al. Research on the Protection Mechanism of Electric Power Grid Based on 2 M Business[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16):106-111.
- [7] 郭宝宁.面向电力设备的温度检测节点功耗研究及自供电电源设计[J].数据采集与处理,2018,33(6):72-74.
- GUO Baoning. Power Consumption and Design of Self-powered Energy Management for Temperature Detecting Node Used in Power Systems [J]. Journal of Data Acquisition Processing, 2018, 33(6):72-74.
- [8] 赵金利,范朕宁,李鹏,等.基于 SUNDIALS 的有源配电网随机动态仿真方法[J].电力系统自动化,2017,41(6):51-58.
- ZHAO Jinli, FAN Zhenning, LI Peng, et al. SUNDIALS Based Stochastic Dynamic Simulation Method of Active Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):51-58.
- [9] 黄鑫,陈德成,孙军,等.网络攻击下电力系统信息安全研究综述[J].电测与仪表,2017,54(23):68-74.
- HUANG Xin, CHEN Decheng, SUN Jun, et al. A Review of Information Security Research in Power System under Cyber Attack[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(23):68-74.
- [10] 吴成业,刘光晔,孙瑞,等.应用潮流方程简化网络计算的电力系统小干扰稳定分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(6):10-15.
- WU Chengye, LIU Guangye, SUN Rui, et al. Small Signal Stability Analysis of Power System with Simplified Network Computing Using Power Flow Equations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(6):10-15.
- [11] 李倩文,李莹,张荣,等.线性与非线性传热过程的 Curzon-Ahlborn 热机在任意功率时的效率[J].物理学报,2017,66(13):63-70.
- LI Qianwen, LI Ying, ZHANG Rong, et al. Efficiency at Arbitrary Power for the Curzon-Ahlborn Heat Engine in Linear and Nonlinear Heat Transfer Processes[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(13):63-70.
- [12] 扈诗扬,杨萌,汪芳荣.基于坐标旋转变换的配电系统快速解耦潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(4):40-44.
- HU Shiyang, YANG Meng, WANG Fangzong, et al. A Fast Decoupled Load Flow Method for Distribution System Via Coordinate Rotation Transformation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4):40-44.
- [13] 黄裕春,王宏,文福拴.含区间数的电力应急网络最优调度路径的确定[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(1):19-25.
- HUANG Yuchun, WANG Hong, WEN Fushuan. Determining of Optimal Scheduling Path in Power Emergency Support Network Represented by Interval Values[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1):19-25.
- [14] 王延忠,郭超,宁克焱,等. Cu 基粉末冶金摩擦元件接触压力仿真与试验[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(1):134-140.
- WANG Yanzhong, GUO Chao, NING Keyan, et al. Sintered Bronze Friction Pair Contact Pressure Simulation and Experiment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(1):134-140.
- [15] 韦磊,刘锐,高雪,等.电力 LTE 无线专网安全防护方案研究[J].江苏电机工程,2016,35(3):29-33.
- WEI Lei, LIU Rui, GAO Xue, et al. Research on Security Protection Solution to LTE Power Wireless Private Network[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):29-33.