

DOI: 10.7667/PSPC170339

# 基于元胞自动机的电网隐性故障传播模型 关键线路识别方法

李辉, 贾晓风, 李利娟, 吴军, 马碧蔓

(湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 有效辨识电网中关键线路对优化电网结构、减少电网连锁故障具有重大意义。为此, 考虑电网线路隐性故障, 建立了基于元胞自动机理论的电网隐性故障模型, 并在此基础上提出了一种综合考虑线路两端负荷量、线路故障频率和线路邻居数量的电网关键线路辨识方法。以 IEEE39 节点系统为算例, 识别了该节点系统的关键线路, 并通过与别的方法对比验证了该模型的合理性及其电网关键线路辨识方法的有效性。该模型和方法能为电网连锁故障模型和脆弱性评估提供新的参考。

**关键词:** 电力系统; 元胞自动机; 隐性故障模型; 复杂网络; 连锁故障

## An approach for critical lines identification of power grid hidden fault propagation model based on cellular automata

LI Hui, JIA Xiaofeng, LI Lijuan, WU Jun, MA Biman

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Effective identification of the key lines in a power grid plays a significant role in optimizing the structure and reducing the chain failures of power grid. Therefore, a hidden failure model based on the cellular automata theory considering line hidden failures of power grid is proposed. On this basis, a critical line identification method for power grid is proposed which comprehensively considers load capacity of double terminals, line fault frequency and neighbors of line. Taking IEEE39 node system as a numerical example, this paper identifies its critical lines and verifies the rationality and validity of the proposed model of the method by comparison with other methods. The proposed model and method can provide a new reference for power grid cascading failure model and vulnerability assessment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307148) and Hunan Education Department Project (No. 16C1543).

**Key words:** power system; cellular automata; hidden failure model; complex network; cascading failure

## 0 引言

近年来大停电事故在全世界范围内频繁发生<sup>[1-3]</sup>, 从历次大停电事故看来, 其主要原因在于输电线路和变电设备发生故障<sup>[4]</sup>。电网运行中一旦输电线路发生故障, 可能引起较大的电网潮流波动, 甚至导致电网连锁故障。因此有效辨识电网关键线路, 优化电网网架结构, 对提升电网可靠性、预防大停电事故具有重大意义<sup>[5-6]</sup>。

目前关键线路辨识的主要方法有: 基于复杂网络理论的方法和基于电网电气性能的分析方法。基于复杂网络理论的方法主要从复杂系统视角建立系统拓扑模型<sup>[7-10]</sup>来研究电网的脆弱环节, 对电力系统自身电气特征以及运行中约束条件的考虑有待加强; 基于电网电气性能的分析方法则考虑电网自身的电气状态以及引发电网连锁故障的相关因素, 主要通过定义风险指标建立关键线路评估模型<sup>[11-14]</sup>来研究电网的脆弱环节, 更加贴近实际描述的电网自身运行状态以及电网事故发展过程, 但是动态计算却很复杂。

辨识电网关键线路不仅需要考虑电网拓扑特

性, 还需要考虑线路在故障传播中的作用, 才能有效地通过对关键线路的管理和控制, 起到预防大停电的风险。因此识别关键线路需要建立既能描述电网物理性能, 同时又不增加模型计算复杂性的电网连锁故障模型。

元胞自动机算法(Cellular Automata, CA)是处理复杂电力系统的一种有效的方法<sup>[15]</sup>。利用CA算法, 用元胞表述电网基本单元, 用元胞状态表述当前时刻电网基本单元的状态, 用元胞空间表述电网整体状态以及用元胞规则表述电网故障的传播规则, 来简单有效地体现电网故障线路间故障传播情况。同时隐性故障是造成电网连锁故障的一个重要因素<sup>[16]</sup>, 所以本文考虑电网隐性故障, 利用CA描述电网拓扑、线路连接负荷量等电气特性, 并优化电网故障传播规则, 建立了电网隐性故障CA传播模型, 进而辨识出电网关键线路, 并利用IEEE39节点算例验证了模型的有效性。

## 1 电网隐性故障CA传播模型

### 1.1 元胞、元胞空间、元胞状态、元胞邻居和元胞时间的定义

在CA算法中, 需要将研究对象抽象化为元胞、元胞空间、元胞状态、元胞邻居、元胞时间以及元胞间状态传递规则<sup>[15]</sup>。本文根据电网的电气性能, 构建了以输电线路为元胞、以输电线路间的连接关系为邻居关系、以整体元胞为元胞空间、以元胞扰动间的等间隔时间为单位元胞时间, 以电网故障传播规则为元胞规则模型。

1) 元胞的定义: 单个元胞为电网中的一条输电线路, 元胞序号表示为 $i$ ,  $i=1,2,\dots,e$ ;  $e$ 为电网中输电线路总数。

2) 元胞空间: 元胞空间由所有元胞组成, 包括各个元胞的电气属性和整个网络的拓扑情况, 准确地体现各元胞在电网中的分布情况以及整个电网的潮流转移情况。

3) 元胞状态: 元胞 $i$ 的状态 $s_i$ 分为正常、故障以及临界态三种。

$$s_i = \begin{cases} 0 & \text{正常} \\ 1 & \text{故障} \\ \text{临界态} & \text{以一定概率故障} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 0 为元胞正常状态, 此时元胞正常传递电网潮流, 向负荷供电; 1 为故障状态, 此时故障元胞的潮流按照潮流转移原则转移到其邻居上(潮流转移原则在本节4)中详细介绍); 临界态时表明该元胞处于隐性故障状态, 元胞按一定概率断开。

4) 元胞邻居定义及状态传递: 以各线路相邻的线路来定义各个元胞的邻居, 本文定义元胞的度为与其相连接的元胞数量。用线路邻接矩阵 $A$ 表示整个网络的连通情况, 即元胞邻接矩阵, 通过对 $A$ 的行求和, 得到各元胞的度 $D$ ; 通过对各元胞状态的计算分析得到元胞状态矩阵 $B$ ; 假设一个6节点的电网如图1所示。

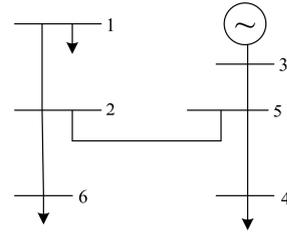


图1 6节点电网拓扑结构

Fig. 1 Grid topology including six nodes

图1拓扑结构所示的元胞状态矩阵 $B_{t_0}$ 为

$$B_{t_0} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & \rightarrow & a_1 \\ 2 & 5 & \dots & \rightarrow & a_2 \\ 2 & 6 & \dots & \rightarrow & a_3 \\ 3 & 5 & \dots & \rightarrow & a_4 \\ 4 & 5 & \dots & \rightarrow & a_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中每一行对应着一条电网线路的参数, 前两位参数描述该线路两端的节点编号, 其余参数代表该线路的其他电气参数,  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 分别表示各线路的元胞, 得到图2所示的电网元胞拓扑结构。图中,  $a_1, a_2, a_3$ 通过电网2号节点相连接,  $a_2, a_4, a_5$ 通过电网5号节点相连接, 用矩阵 $A_{t_0}$ 表示图2中各元胞的关系, 矩阵 $A_{t_0}$ 为对称矩阵, 每一行或每一列均表示某一个元胞与其他元胞的连接关系, 即元胞的邻居关系, 对 $A_{t_0}$ 的各行分别求和得到 $D_{t_0}$ , 即得到对应元胞的度。

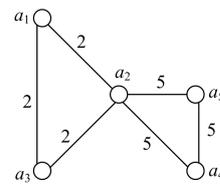


图2 6节点电网的元胞结构拓扑图

Fig. 2 Cellular structure topology of six-node power grid

$$A_{t_0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_0 = [2 \ 2 \ 4 \ 2 \ 2]^T \quad (4)$$

利用元胞状态的传递来描述电网故障过程, 故障元胞向下级邻居传递潮流的等间隔时间为  $\Delta t$ , 假设  $t_0$  时刻,  $a_1$  故障,  $t=t_0+\Delta t$  时刻,  $a_1$  的潮流根据  $a_2$ 、 $a_3$  的阻抗值按照式(5)、式(6)转移到  $a_2$ 、 $a_3$  上。

$$\Delta F_{a_2} = \frac{Z_{a_3}}{Z_{a_2} + Z_{a_3}} \times \Delta F_{a_1} \quad (5)$$

$$\Delta F_{a_3} = \frac{Z_{a_2}}{Z_{a_2} + Z_{a_3}} \times \Delta F_{a_1} \quad (6)$$

$Z_{a_{(i)}}$  为元胞  $i$  的阻抗,  $\Delta F_{a_{(i)}}$  为元胞  $i$  的潮流转移量, 电网元胞拓扑结构变化如图 3 所示。

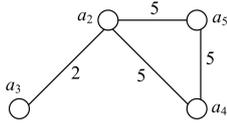


图 3  $t=t_0+\Delta t$  时刻电网元胞结构拓扑图

Fig. 3 Cellular structure topology of power grid when  $t=t_0+\Delta t$

此时电网的元胞状态矩阵  $B_{t_0+\Delta t}$ 、元胞邻接矩阵  $A_{t_0+\Delta t}$  以及  $D_{t_0+\Delta t}$  分别为

$$B_{t_0+\Delta t} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & \dots \\ 2 & 6 & \dots \\ 3 & 5 & \dots \\ 4 & 5 & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_{t_0+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D_{t_0+\Delta t} = [1 \ 3 \ 2 \ 2]^T \quad (9)$$

若  $t=t_0+\Delta t$  时刻各元胞状态均为 0, 元胞状态传递结束; 否则故障元胞的潮流将在下一个  $\Delta t$  时刻按照式(5)、式(6)继续向下级邻居元胞转移, 直至各元胞状态均为 0。

5) 元胞时间: 本文在电网隐性故障 CA 传播模型基础上对电网故障进行研究, 定义元胞时间为元胞扰动间的间隔时间, 采用等时间间隔的处理方法<sup>[15]</sup>, 如图 4 所示。图中, 在  $T$  时段内, 发生了 5 次电网事故(即  $\text{fault}_1 \sim \text{fault}_5$ ),  $t_1$  为等时间间隔的单位元胞时间。单位元胞时间负荷损失量为电网  $T$  时段内负荷损失量除以  $T$ , 其值越小, 该电网在相同时间段内的负荷损失量越小; 故障平均间隔时间定义为时段  $T$  除以电网故障次数, 其值越大, 该电网发生故障的概率越小, 图中故障平均间隔时间为  $T/5$ 。

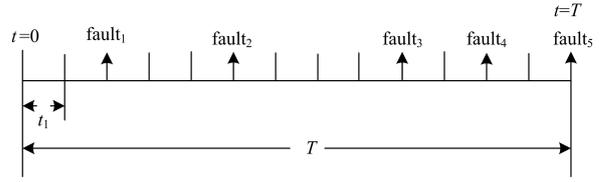


图 4 元胞时间

Fig. 4 Cellular time

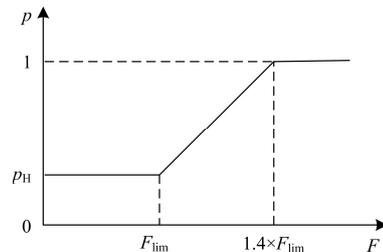
### 1.2 考虑隐性故障的电网元胞状态转换规则

考虑隐性故障的电网故障规则模型主要包括元胞状态判别模型和元胞拓扑更新。

由于隐性故障对大停电事故起到推波助澜的作用, 因此在元胞状态判别模型中考虑了电网隐性故障因素。电网隐性故障是由于电网保护系统的异常运作引起的, 主要分为线路距离保护引发的隐性故障、线路过流保护引发的隐性故障和线路潮流超限引发的隐性故障等<sup>[17]</sup>。

本文采用潮流超限保护的隐性故障概率模型来建立元胞状态判别模型。当电网抽象为一个以电网线路为元胞的拓扑结构后, 若某一条电网线路故障, 即代表该线路的元胞故障, 其线路潮流通过元胞状态改变, 将改变的状态传递叠加到其邻居元胞上, 其邻居元胞的继电保护装置根据其潮流变化而动作, 相应改变自身状态。

设在  $t_0$  时刻, 电网中第  $i$  条线路发生故障, 即元胞  $i$  故障断开, 其元胞状态  $s_{i,t_0}=1$ ; 在  $t=t_0+\Delta t$  时刻, 线路潮流  $F_{i,t_0}$  按照潮流分配原则传递到与其相邻的线路上, 即  $F_{i,t_0}$  按照式(5)、式(6)分配到元胞  $i$  的各个邻居元胞  $j$  上, 此时故障线路的邻居由于潮流叠加而导致其状态改变, 根据线路潮流超限引发的隐性故障特征, 按照图 5 所示模型来判别元胞  $j$  的状态  $s_{j,t_0+\Delta t}$ 。



$p_H$  为隐性故障概率;  $p$  为线路故障概率;  $F$  为线路有功潮流

图 5 潮流超限保护隐性故障概率模型

Fig. 5 Hidden failure probability model of power flow off-limit protection

隐性故障体现在元胞状态改变对相邻元胞状

态改变的影响概率, 隐性故障概率  $p_H$  极小, 取  $p_H=0.02^{[17]}$ , 定义元胞  $j$  状态改变的阈值  $F_{j,\text{lim}}$  为线路的最大传输容量, 当线路潮流  $F_{j,t_0+\Delta t}$  小于  $F_{j,\text{lim}}$  时, 元胞  $j$  故障(状态为 1)的概率为

$$p_{j,t_0+\Delta t} = p_H \quad (10)$$

大部分时刻元胞为正常状态, 即元胞状态  $s_{j,t_0+\Delta t}$  为 0, 若此时元胞以小概率  $p_H$  故障, 则元胞状态  $s_{j,t_0+\Delta t}$  为 1。

当线路潮流  $F_{j,t_0+\Delta t} \in (F_{j,\text{lim}}, 1.4 \times F_{j,\text{lim}})$  时, 此时元胞  $j$  处于临界状态, 元胞  $j$  的故障概率为

$$p_{j,t_0+\Delta t} = (F_{j,t_0+\Delta t} - F_{j,\text{lim}}) \times \frac{1 - p_H}{1.4 \times F_{j,\text{lim}} - F_{j,\text{lim}}} + p_H \quad (11)$$

当线路潮流  $F_{j,t_0+\Delta t} > 1.4 \times F_{j,\text{lim}}$  时, 元胞  $j$  的故障概率为

$$p_{j,t_0+\Delta t} = 1 \quad (12)$$

即该线路故障断开, 元胞状态  $s_{j,t_0+\Delta t}$  为 1。

若此时电网故障传播结束, 即故障元胞的邻居元胞  $j$  无故障情况则元胞状态判别结束; 若此时电网故障传播未结束, 即故障元胞的邻居元胞  $j$  存在故障情况, 则按照上述故障后的过程继续传递故障元胞的潮流至其邻居上, 直至所有故障元胞的邻居均为正常运行状态。

当电网故障传播结束后, 开始更新元胞拓扑。此时, 电网被分解成若干个孤岛, 各孤岛按照功率平衡原则更新元胞拓扑<sup>[18]</sup>: 若各孤岛内功率平衡, 则直接更新元胞拓扑结构; 如果功率不平衡, 则切除部分负荷使得各孤岛内功率平衡后更新元胞拓扑结构。

### 1.3 电网隐性故障 CA 传播模型流程图

根据上述元胞、元胞空间、元胞状态、元胞邻居和元胞时间的定义, 以及元胞状态转换规则, 得到模型仿真流程如图 6。

步骤一: 计算电网中各个元胞所通过的初始潮流  $F_0$  以及描述各元胞状态的矩阵  $B_0$ , 且令  $n=0$ ,  $t=0$ ,  $n$  为扰动次数, 此时刻所有元胞正常运行。

步骤二: 按各元胞的  $F_0$  设定其潮流阈值  $F_{\text{lim}}$ 。

步骤三: 随机选择一个元胞  $i$  进行攻击, 若攻击后元胞正常则继续执行第三步; 若元胞  $i$  越限故障, 则转到第四步。

步骤四: 根据  $B_0$  矩阵得到各元胞阻抗值, 根据元胞  $i$  的邻居  $j$  的阻抗值, 利用式(5)、式(6)传递电网过载潮流, 并利用式(10)一式(12)判别元胞  $j$  的状

态, 循环此步骤直至所有元胞均不越限, 更新电网元胞拓扑结构, 转第五步。

步骤五: 根据电网拓扑更新模型判别电网的孤岛数  $m$ , 并判别各孤岛内功率是否平衡, 若所有孤岛内功率均平衡则更新各元胞潮流, 更新电网元胞拓扑结构, 令  $n=n+1$ , 且  $t=n \times t_1$ , 转第三步; 若存在孤岛功率不平衡, 则对功率不平衡的孤岛切除负荷, 直至电网稳定运行, 即故障结束; 最后统计故障规模, 仿真结束。

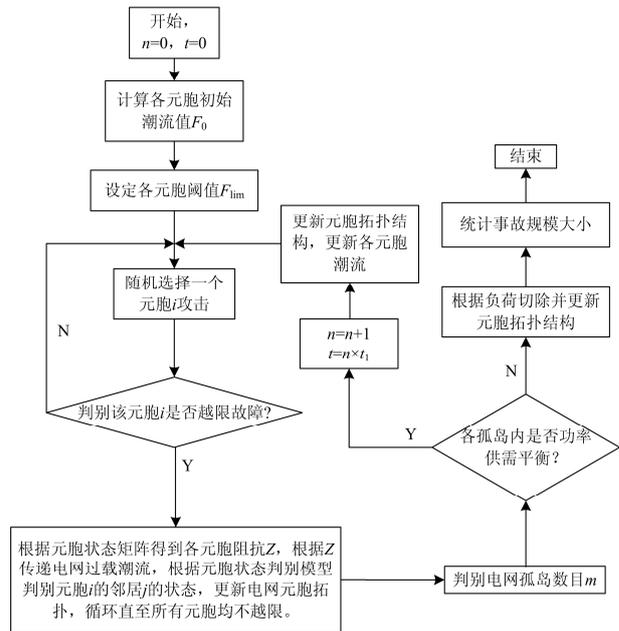


图 6 电网隐性故障传播 CA 模型流程图

Fig. 6 Flow chart of hidden fault propagation cellular automata model of power grid

## 2 电网关键元胞线路辨识

本节通过隐性故障传播 CA 模型对电网事故综合分析, 提出一种电网关键元胞辨识办法。首先, 从线路两端电网节点的负荷情况来看, 线路两端负荷量越大的线路承载着越多负荷传输任务, 因此其重要性越高; 其次, 从电网故障历史数据来看, 故障频率较高的元胞在电网的稳定安全中值得重点关注, 也即相对重要; 再次, 根据复杂网络理论, 从电网的元胞拓扑结构来看, 元胞的度越大则该元胞在电网中的重要程度越大。因此, 根据如上三个方面定义电网关键元胞选取的综合指标  $Index_k(i)$ 。

通过计算得到电网元胞两端的负荷量和元胞的度, 对本文搭建模型进行仿真, 采集数据得到元胞故障频率, 根据式(13)对每项数据归一化处理得到电网元胞负荷指标  $Index_l(i)$ 、元胞故障频率指标  $Index_f(i)$ 和元胞的度指标  $Index_d(i)$ 。

$$Index\_x(i) = \frac{x(i)}{\max(\mathbf{X})} \quad (x \in (l, f, d)) \quad (13)$$

式中： $i$  为元胞序号； $l(i)$ 、 $f(i)$ 、 $d(i)$  分别表示第  $i$  个元胞的线路两端负荷量、故障频率与元胞的度； $\mathbf{X}$  表示由如上变量组成的向量。

根据上述三个指标对电网差异化规划并得到负荷损失情况，应用层次分析法得到综合指标数学表达式。最后通过对各个元胞综合指标的排名，得到电网中较为重要的元胞。

### 3 算例研究

#### 3.1 模型合理性验证

按照图 6 所示的流程，本文对 IEEE39 节点系统进行仿真。本系统中包含了 10 个发电机节点、18 个负荷节点、11 个变压器节点以及 46 条节点间相互连接的线路组成，拓扑如图 7 所示。

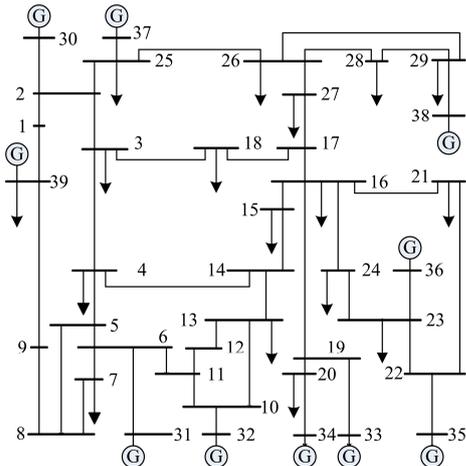


图 7 IEEE39 节点系统拓扑图

Fig. 7 Topology of IEEE39 node system

按照 1.3 节流程，通过设定各元胞不同阈值来对该系统进行仿真，产生 200 次事故，在不同元胞阈值下，故障平均时间间隔和单位元胞时间负荷损失量如表 1 所示。可见，随着元胞阈值的增加，故

表 1 电网具备不同抗扰能力时的负荷损失情况

Table 1 Load losses under different anti-interference capacity of power grid

元胞阈值	故障平均时间间隔	单位元胞时间损失负荷量/MW
$1.0 \times F_{lim}$	$2.6418 \times t_1$	405.254 0
$1.1 \times F_{lim}$	$3.1791 \times t_1$	314.554 4
$1.2 \times F_{lim}$	$4.2637 \times t_1$	251.119 9
$1.3 \times F_{lim}$	$5.3284 \times t_1$	203.644 6
$1.4 \times F_{lim}$	$6.4577 \times t_1$	166.266 6
$1.5 \times F_{lim}$	$8.3284 \times t_1$	127.287 4
$1.6 \times F_{lim}$	$8.4527 \times t_1$	123.475 3

障平均间隔时间明显增加，单位元胞时间负荷损失量显著减少，即提高线路的最大传输容量可降低停电风险，模型结果与电网实际情况相吻合。

当设置各元胞阈值为  $F_{lim}$  时，产生的电网事故序列如图 8 所示。其最大事故规模为 3 973.16 MW，发生在元胞时间  $t=351 \times t_1$ 。对图 8 中的事故规模标度和频度数据在双对数坐标图中进行曲线拟合，如图 9 所示，其幂律分布在双对数坐标下的表达式如式(14)所示。

$$\lg N = -3.704 \times \lg r + 3.689 \quad (14)$$

式中： $r$  为电网事故负荷损失； $N$  为发生同一规模事故的频度。式中幂指数为 -3.704，拟合相关系数为 0.990 9，表明大停电事故的标度与频度拟合有效。利用该模型再次仿真产生 800 次电网事故，得到其事故规模标度、频度幂指数为 -3.56，相关系数为 0.945 7。两次仿真结果显示本文建立的电网隐性故障 CA 模型符合电网连锁故障具有自组织临界性的特性。

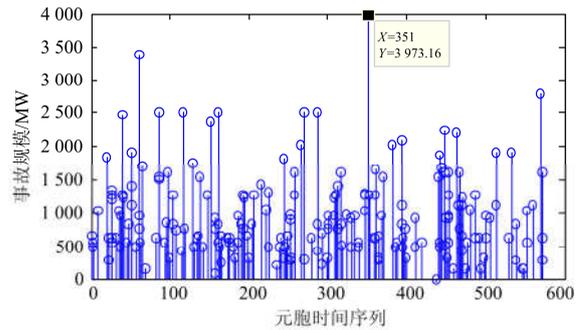


图 8 电网事故规模时序图

Fig. 8 Time sequence of power grid failure scale

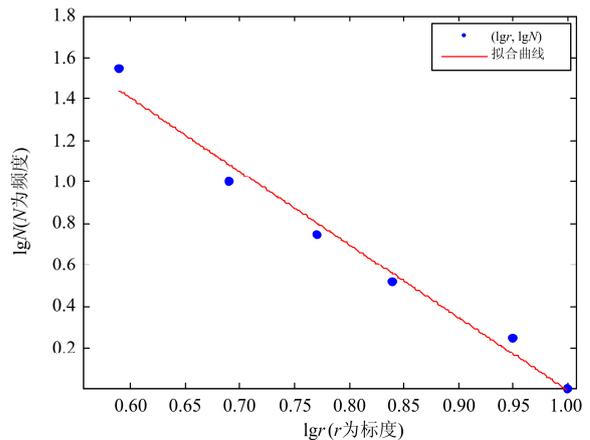


图 9 电网事故规模标度、频度双对数坐标图

Fig. 9 Log-log coordinate of power grid failure scales and frequencies

### 3.2 电网关键元胞辨识

对 IEEE39 节点系统计算得到元胞两端的负荷量和元胞的度; 利用隐性故障传播 CA 模型对该系统进行电网事故仿真, 通过分析仿真结果得到各元胞故障频率。按式(13)求解得到各指标, 并按各指标给元胞排名, 排名前 9 的元胞如表 2 所示。

表 1 显示出当元胞阈值  $F_{lim}$  越高, 元胞的抗扰动能力越强。通过增加元胞阈值, 实现电网差异化规划设计<sup>[19]</sup>。设置电网事故仿真次数为 30 000, 分别对表 2 中按照三种指标得到的关键元胞进行阈值差异化, 并对未进行差异化规划的电网进行同样次数的仿真, 得到各种情况下单位元胞时间负荷损失平均值, 分别表示为  $Loss_{S1}$ 、 $Loss_f$ 、 $Loss_d$ 、 $Loss_{original}$ , 如表 3 所示。

表 2 电网元胞各指标排名

Table 2 Ranking of each index of power grid cellular

排名	$Index\_l(i)$		$Index\_f(i)$		$Index\_d(i)$	
	元胞	参数	元胞	参数	元胞	参数
1	2	1.000 0	29	1.000 0	27	1.000 0
2	17	0.924 2	21	0.903 3	26	1.000 0
3	6	0.684 1	6	0.859 3	44	0.833 3
4	15	0.629 0	7	0.824 2	40	0.833 3
5	34	0.565 9	22	0.804 4	29	0.833 3
6	32	0.565 9	40	0.731 9	28	0.833 3
7	25	0.540 1	31	0.731 9	25	0.833 3
8	29	0.530 6	26	0.701 1	13	0.833 3
9	28	0.501 8	36	0.602 2	10	0.833 3

表 3 不同条件下电网故障损失情况

Table 3 Power grid failure losses under different conditions

名称	$Loss_{original}$	$Loss_{S1}$	$Loss_f$	$Loss_d$
单位元胞时间 负荷损失/MW	378.581 6	304.629 1	306.473 8	314.481 2

从表 3 可见, 从未经过差异化处理的电网故障情况来看, 按各指标进行差异化规划均能有效地减少电网故障损失。各指标中,  $Index\_l(i)$  降低电网负荷损失的度最为显著, 其次是  $Index\_f(i)$ , 故本文以  $Index\_l(i)$  与  $Index\_f(i)$  为主要因素, 并以  $Index\_d(i)$  为辅助因素来考虑关键指标中各指标的权重。根据上述分析, 通过层次分析法到综合指标中各因素的权重, 进而得到综合指标数学表达式如式(15)所示。

$$Index\_k(i) = 0.4761 \times Index\_l(i) + 0.3810 \times Index\_f(i) + 0.1429 \times Index\_d(i) \quad (15)$$

利用式(15)对各元胞综合指标进行排序, 得到元胞的综合指标排名如表 4。对表 4 中元胞进行阈值差异化处理, 得到单位元胞时间内电网负荷损失为 293.545 0 MW。与表 3 中根据各单个指标得到的

故障损失对比, 利用综合指标的关键元胞选取方法能够有效减小电网故障负荷损失, 故该方法合理可行。

对本文方法与文献[6]、文献[7]的关键线路辨识方法进行对比分析。文献[6]主要从电网线路故障导致的过负荷程度、电网线路事故频率等方面反映电网线路的重要程度; 文献[7]主要从加权介数值反映电网线路的重要程度; 而本文综合考虑了线路两端负荷量、故障频率与元胞的度表征的拓扑重要度。选取文献[6-7]中的关键线路以及随机选取 2 组元胞, 分别用  $Line_{W6}$ 、 $Line_{W7}$ 、 $Line_{S11}$ 、 $Line_{S12}$  表示, 如表 5 所示。

表 4 电网关键元胞选取

Table 4 Selection of power grid critical cellular

顺序	$Line_{key}$	起始端	末端	综合指标参数
1	29	16	24	0.752 7
2	6	3	4	0.748 4
3	17	9	39	0.666 8
4	2	1	39	0.595 7
5	7	3	18	0.575 6
6	40	25	26	0.541 8
7	26	16	17	0.540 4
8	25	15	16	0.536 2
9	32	19	20	0.511 7

表 5 选取参考元胞编号

Table 5 Number of selecting reference cellular

线路名称	线路编号								
$Line_{W6}$	26	27	3	13	35	1	9	19	38
$Line_{W7}$	26	25	4	24	27	31	20	22	33
$Line_{S11}$	20	44	39	24	23	15	14	13	9
$Line_{S12}$	22	46	3	4	5	9	32	34	42

对表 4、表 5 中各元胞组进行元胞阈值差异化, 仿真得到各种情况下的电网故障损失, 分别表示为  $Loss_{key}$ 、 $Loss_{W6}$ 、 $Loss_{W7}$ 、 $Loss_{S11}$ 、 $Loss_{S12}$ , 并对未经阈值差异化处理的  $Loss_{original}$ , 如表 6 所示。

表 6 电网负荷损失比较

Table 6 Comparison of power grid load loss

名称	单位元胞时间 电网损失负荷量/MW
$Loss_{original}$	378.581 6
$Loss_{key}$	293.545 0
$Loss_{W6}$	315.976 7
$Loss_{W7}$	313.638 1
$Loss_{S11}$	333.680 0
$Loss_{S12}$	331.028 0

可见, 经过差异化规划后的电网在相同时间内损失的负荷量有不同层次降低。CA 算法、文献[6]、文献[7]选取的关键元胞进行差异化处理的负荷损失情况, 效果均好于随机选取元胞进行差异化规划, 可见甄选关键线路进行差异化规划更有利于电力系统可靠性的提高。采用基于 CA 模型提炼的关键元胞, 与文献[6]、文献[7]选取的关键线路进行对比, 前者负荷损失更小, 证明了本文对关键线路辨识较为合理有效。

#### 4 结论

本文在考虑隐性故障因素及根据电网实际物理特性优化了元胞潮流转移规则的基础上, 建立了电网隐性故障 CA 传播模型。并通过仿真获得了故障损失规模、故障发生频率等电网故障数据, 验证了模型的合理性。

利用电网隐性故障 CA 传播模型, 提出了综合考虑线路两端负荷量、故障频率与元胞的度表征的拓扑重要度的关键元胞辨识指标, 识别了电网重要线路。通过仿真结果对比, 验证了本文关键元胞辨识方法的有效性。

本文建立的模型与提出的辨识电网关键线路方法为电网差异化规划提供了理论基础, 对提高电力系统安全和可靠性、降低大停电事故发生频率具有一定指导意义。

#### 参考文献

- [1] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-62, 68.  
QU Jing, GUO Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-62, 68.
- [2] 葛睿, 董昱, 吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 1-6.  
GE Rui, DONG Yu, LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 1-6.
- [3] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.  
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [4] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-23.  
LI Rongrong, ZHANG Ye, JIANG Quanyuan. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 18-23.
- [5] CHOUBINEH M, ANSARI B, MOHAGHEGHI S. Vulnerability assessment of the power grid against progressing wildfires[J]. Fire Safety Journal, 2015, 73: 20-28.
- [6] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于事故链模型的电网关键线路辨识[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2306-2313.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Critical lines identification of power grid based on the fault chain model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2306-2313.
- [7] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.  
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [8] YAN J, HE H, ZHONG X, et al. Q-learning Based Vulnerability Analysis of Smart Grid against Sequential Topology Attacks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(1): 200-210.
- [9] FANG J, SU C, et al. Power system structural vulnerability assessment based on an improved maximum flow approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9: 1-8.
- [10] 杨文辉, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于电网生存性评估的关键线路识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 29-35.  
YANG Wenhui, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. An approach for critical lines identification based on the survivability of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 29-35.
- [11] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [12] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.  
LIU Xiaoli, MAO Ge, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and

- Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [13] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.  
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.
- [14] 张富超, 谢成荣, 沈立新, 等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 7-12.  
ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 7-12.
- [15] 于群, 曹娜, 郭剑波. 基于元胞自动机的电力系统自组织临界特性仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 1-5.  
YU Qun, CAO Na, GUO Jianbo. Simulation model of power system self organization criticality based on cellular automata[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 1-5.
- [16] ELIZONDO D C, REE J D L. Analysis of hidden failures of protection schemes in large interconnected power systems[C] // Power Engineering Society General Meeting: IEEE, 2004: 107-114.
- [17] 杨明玉, 田浩, 姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 1-5.  
YANG Mingyu, TIAN Hao, YAO Wanye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 1-5.
- [18] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.  
CHENG Haozong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [19] 潘旭东, 吴军, 刘涤尘, 等. 基于元件重要度的差异化规划核心骨干网架构建方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 40-46.  
PAN Xudong, WU Jun, LIU Dichen, et al. A method for constructing core backbone grid in differential planning based on importance degrees of components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 40-46.

---

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-08-20

作者简介:

李 辉(1974—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为能源互联网以及新型电力电子装置; E-mail: lihui7402@126.com

贾晓风(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全; E-mail: 89497042@qq.com

李利娟(1980—), 女, 通信作者, 副教授, 研究方向为电力系统安全。E-mail: lilj@xtu.edu.cn

(编辑 魏小丽)