

# 基于临界自组织理论的电力系统脆性分析\*

闫丽梅<sup>1</sup>, 徐建军<sup>1</sup>, 许爱华<sup>1</sup>, 李宏玉<sup>1</sup>, 高峰<sup>2</sup>

(1 大庆石油学院 电气工程系, 黑龙江 大庆 163318;

2 大庆油田热电厂 发电分厂, 黑龙江 大庆 163314)

**[摘要]** 基于临界自组织理论, 运用元胞自动机建立了电力系统脆性模型, 并通过对6节点系统的脆性仿真, 探讨了系统脆性激发的规律。结果表明, 脆性发生时大都具有从临近线路向外蔓延的特点; 脆性的发生和电力线路的负载状况有关; 只有少部分元件能激发系统的脆性。

**[关键词]** 电力系统; 脆性分析; 临界自组织; 连锁性崩溃; 元胞自动机

**[中图分类号]** TM 712

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2006)12-0231-04

近几十年来, 随着电力系统发展规模的不断扩大和复杂性的逐步增加, 在世界范围内, 电力系统发生大停电的次数也随之增多, 给国家和人民造成了许多不可挽回的经济损失, 同时也给社会带来很大的影响<sup>[1]</sup>。系统脆性理论是研究系统连锁反应现象的一种理论, 是分析系统连锁性故障的一种有效方法, 如果系统处于自组织临界状态将会引发系统的连锁性崩溃, 所以自组织临界状态是系统脆性发生的根源。目前, 关于系统脆性的研究已有许多报道, 如文献[2]从复杂系统子系统间相关特性方面分析了崩溃的过程; 文献[3]进行了基于滑动 $t$ 检验法的系统脆性分析; 文献[4]基于脆性势函数对复杂系统进行了脆性分析; 文献[5]进行了基于脆性联系熵的复杂系统崩溃致因研究; 文献[6]应用FAHP方法对系统的脆性进行了分析。电力系统大停电主要是由于连锁性故障引起的<sup>[7]</sup>, 所以对电力系统进行脆性分析有望揭示目前电力系统大停电的机理。为此, 本研究基于临界自组织的理论, 分析了电力系统脆性的根源和过程, 以期对电力系统连锁性故障的预防提供参考。

## 1 复杂系统脆性的定义和特性

脆性(Brittleness)理论是研究系统发生连锁性故障而导致系统崩溃的理论<sup>[2]</sup>。一般地, 由于受内部或外部干扰因素的作用, 系统的某一部分(子系统)因故障而崩溃, 从而使与其相关联的部分(子系统)受到影响, 甚至发生崩溃, 如此下去系统发生连锁性

故障, 最终导致整个系统崩溃。系统崩溃是系统的脆性被激发的结果。

系统的脆性存在于系统内部, 是系统的一种属性, 具有如下特点: 潜伏性; 连锁性; 巨大危害性; 激发初期的隐蔽性; 涌现性; 系统功能的不可自动恢复性; 整体性; 非合作博弈性。作为系统属性的脆性是隐性的, 只有满足一定的激发条件时, 系统的脆性才会显示出来。系统的连锁性崩溃是系统脆性被激发出来后的表现形式。

## 2 临界自组织性研究的现状

临界自组织(Self-organized criticality, 简称SOC)理论是Bak于1987年提出的<sup>[8]</sup>。临界自组织是指一类开放的、动力学的、远离平衡态的、由多个单元组成的复杂系统, 能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界状态, 在此临界状态下, 小事件能引起连锁反应事故, 并对系统中的部分组元产生影响, 遍及整体的连锁反应是系统动态行为的本质, 在宏观上表现为小事故的发生比大事故多。处于自组织临界状态的系统在空间上呈现分形结构, 在时间上呈现“ $1/f$ 噪声”及时间上的标度不变性和长程时间关联, 其低频功率谱表现的行为符合指数规律( $f^{-\beta}$ )。

电力系统大停电是系统处于临界状态时, 在微小的扰动下触发连锁反应并导致灾变的现象。自组织临界性的概念可望成为揭示包括大停电现象在内的复杂电力系统整体行为特征的有效工具之一。在

\* [收稿日期] 2005-12-07

[基金项目] 黑龙江省教育厅科学技术研究基金项目(10551014)

[作者简介] 闫丽梅(1971-), 女, 黑龙江阿城人, 副教授, 博士, 主要从事电力系统安全分析研究。

自组织临界状态下,一个小事件会引发一个大事件乃至突变。自组织临界性概念的基本观点认为,电力系统总是处于持续的非平衡状态,由于系统内部和外部诸多要素之间的相互作用,它们可以组织成为一种临界稳定的状态,即临界状态<sup>[9]</sup>。美国学者Carreras等<sup>[10-11]</sup>已经用数据证明了北美电力系统频繁大停电,是因为电力系统工作于自组织临界状态所致。他们用15年的大停电数据证明了电力系统大停电损失的负荷与发生频率的幂律关系。但是他们只是用概率的方法研究了电力系统发生连锁性崩溃的分布问题,建立了几种简单的模拟模型,均不适用于实际的电力系统。为此,本文采用元胞自动机方法建立了实际电力系统的脆性模型,以模拟小型电力系统的连锁性崩溃现象。

### 3 电力系统的临界自组织

复杂系统的大多数组成部分(子系统)状态的改变只会影响它的邻域,只有少量的、剧烈的状态转变会影响(改变)系统的根本特性,这一特性能很好地用“沙堆模型”(Sand pile model)来反映。临界自组织理论的一个典型模型就是沙堆模型。沙堆模型就是选择一个平板,使沙子一次一粒,缓慢而均匀地坠落到一个平板上。开始沙粒仅停留在坠落位置附近,但不久沙粒就停留在其他沙粒的上面形成一个缓坡的沙堆。沙堆某处的坡度过陡时,沙粒将发生滑坡,引起小“雪崩”;随着沙粒的增加,沙堆的坡度变陡,“雪崩”的平均规模增加,一些沙粒开始落到圆盘以外。当添加到沙堆上的沙粒与落到平板外的沙粒的数量在总体上达到平衡时,沙堆就停止增长,此时沙堆系统达到临界状态。向处于临界状态的沙堆加入沙粒时,新加的沙粒可能引起不同规模的雪崩。随着更多沙粒的坠落和沙堆坡角的变大而达到临界安定角时,崩溃的平均规模也随之增大。从原则上讲,当一粒沙坠落到呈临界状态的沙堆上时,将触发任意规模的崩溃,直至发生灾变事件。由此可知,崩溃的动力学机制是一种连锁反应(Chain reactions)或“分支过程”(Branch processes)<sup>[9]</sup>。

沙堆模型可以用二维格子来模拟。定义二维平台网格上的一个格子的坐标为 $(x, y)$ ,用 $Z(x, y)$ 表示落入每一格子的沙粒数,每个格子中沙粒的最多数量(临界值)为 $Z_{cr}$ 。

开始时,沙子的落点是随机选取的,则有:

$$Z(x, y) = Z(x, y) + 1 \quad (1)$$

当某处沙子的数量超过这个临界值,则有:

$$Z(x, y) = Z(x, y) - (Z_{cr} + 1) \quad (2)$$

$$Z(x \pm 1, y) = Z(x \pm 1, y) + 1 \quad (3)$$

$$Z(x, y \pm 1) = Z(x, y \pm 1) + 1 \quad (4)$$

即超过临界值的格子将减去临界值,此格子的上下左右都增加1。当临近格子的沙子数量也超过临界值,同样的过程也会发生。这样,当这个过程继续下去的时候,可能至少一个邻近格子的高度会达到临界值,所以最初的崩溃事件就导致了第二个崩溃事件。以此类推,好像多米诺骨牌一样,形成了崩溃的连锁反应。

电力系统的崩溃和沙堆的崩溃极为相似<sup>[11]</sup>。二者的相似性比较如表1所示。

表1 电力系统和沙堆模型的相似之处

Table 1 Analogy between power system and sand pile

系统特征 System characteristic	电力系统 Power system	沙堆 Sand pile
系统状态 System state	负载模式 Loading pattern	侧面梯度 Gradient profile
驱动力 Driving force	客户需求 Customer load	沙子的增加 Addition of sand
缓解力 Relaxing force	停电反应 Response to blackout	重力 Gravity
事件 Event	电流极限或跳闸 Limit flow or trip	沙堆崩溃 Sand topples

电力系统在研究连锁反应故障时完全可以用临界自组织来考虑。电力系统的崩溃可以看作是电力系统工作于自组织临界态时的一种表现。当电力系统的某个元件由于过载而使系统保护断开此线路时,将引起电流在电网中的重新分配。因此,与这条线路有关联的线路的负载将会不同程度地有所增大。当这种增大超过了某条线路的承受能力,则有可能使这条线路由于保护而断开,这又将引起电流在电网中的重新分配,如此下去,故障连锁发生,最终有可能使整个电力系统处于崩溃的境地。

### 4 基于元胞自动机的电力系统脆性仿真

基于临界自组织理论,建立电力系统的脆性模型的步骤如下。

用1个二维的元胞自动机代表一个电力系统,每个元胞代表一个电力系统的元件,比如支路、发电机或负载。用 $M$ 代表电力系统中的节点个数,则电力系统中的最大元件的个数为 $M \times M$ 个。每个元胞有唯一的1个坐标 $(x, y)$ 。坐标对应电力系统的元件分类为:当 $x = y$ 时,代表电力系统中的1个节点,这个节点可能是发电机也可能是负载;当 $x \neq y$ 时,代表连接两个节点的支路。

当坐标  $(x, y)$  有电力系统中的元件时, 则令  $C(x, y) = C(y, x) = 1$ 。反之, 如果没有, 则令  $C(x, y) = C(y, x) = 0$ 。

令  $P(x, y)$  为电力系统中元件的潮流量。其参数的设置为: 当  $x = y$  时, 如果  $P(x, y) > 0$ , 则表示此元件为发电机; 如果  $P(x, y) < 0$ , 则表示此元件为负载。当  $x \neq y$  时, 如果  $P(x, y) > 0$ , 则表示此元件从  $x$  到  $y$  的支路潮流为正; 如果  $P(x, y) < 0$ , 则表示此元件从  $x$  到  $y$  的支路潮流为负。

令  $P^{max}(x, y)$  为电力系统中元件的潮流极限值, 且  $P^{max}(x, y) = P^{max}(y, x)$ 。如果超过此值, 则此元件退出运行, 令  $C(x, y) = C(y, x) = 0$ 。

元件如果满足退出运行的条件, 则为了保证电力系统的功率恒定不变, 将此元件的功率平均分配到与其相邻的元件中。具体的分配方法为: 如果退出运行的元件为支路, 则与此支路两个节点相连接的支路为相邻元件; 如果退出运行的元件为发电机或负载, 则其相邻的元件为与此元件相连的支路。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} -2.400 & 0.074 & 0.000 & -0.800 & -0.767 & -0.908 \\ -0.074 & -1.600 & 0.000 & 0.000 & -0.874 & -0.655 \\ 0.000 & 0.000 & -2.400 & -2.400 & 0.000 & -2.215 \\ 0.800 & 0.000 & 2.400 & 3.200 & 0.000 & 0.000 \\ 0.767 & 0.874 & 0.000 & 1.649 & 0.000 & \\ 0.908 & 0.655 & 2.215 & 0.000 & 0.000 & 1.551 \end{bmatrix},$$

$$P^{max} = \begin{bmatrix} -4.00 & 1.00 & 0.00 & 3.00 & 3.00 & 1.60 \\ 1.00 & -6.00 & 0.00 & 0.00 & 1.50 & 0.95 \\ 0.00 & 0.00 & -4.00 & 3.00 & 0.00 & 2.50 \\ 3.00 & 0.00 & 3.00 & 5.00 & 0.00 & 0.00 \\ 3.00 & 1.50 & 0.00 & 0.00 & 7.50 & 0.00 \\ 1.60 & 0.95 & 2.50 & 0.00 & 0.00 & 7.50 \end{bmatrix}$$

选取第4个节点为断开点, 则由于第4个节点的断开而导致其他节电断开的顺序见图1。

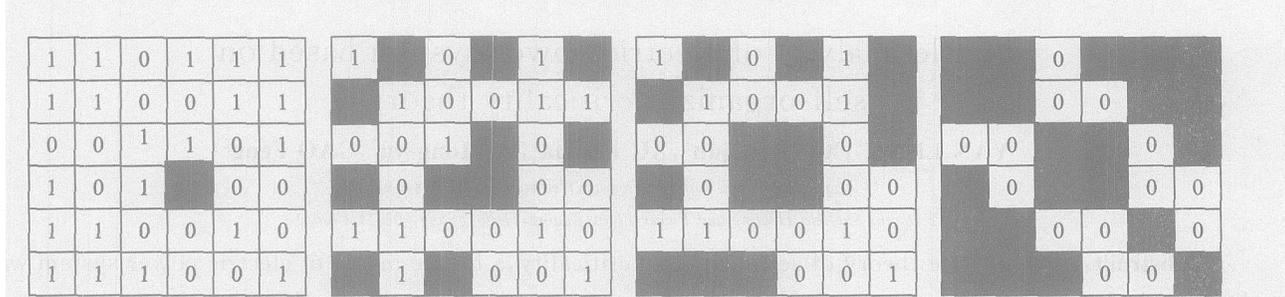


图1 第4个节点断开后的连锁断开顺序  
黑色表示开断的顺序

Fig 1 Cascading failure order after the 4th node break  
Black indicates failure order

从图1可以看出, 开断的顺序依次为:

下面给出具体的步骤:

步骤1: 给  $M, C(x, y), P(x, y), P^{max}(x, y)$  赋初值

步骤2: 随机选取某一元件, 令其断开, 则有:  $C(x, y) = C(y, x) = 0, P(x, y) = P(y, x) = 0$ , 计算其相邻的支路数  $N$ , 则相邻每个支路获得的潮流为:

$$\Delta P = \frac{P(x, y)}{N} \quad (5)$$

此时每个相邻支路的潮流为

$$P(x, y) = |P(x, y)| + \Delta P \quad (6)$$

式中, 绝对值表示不区分潮流的方向。

步骤3: 检查所有相邻支路是否超过其允许的极限值, 如果没有则结束; 否则返回步骤2; 如果满足全部的  $C(x, y) = 0$ , 则结束。

选取一个有6个节点的电力系统<sup>[12]</sup>, 应用直流潮流法对系统中各支路的潮流进行求解, 然后进行脆性过程的仿真。模型中的参数设置如下:

$$M = 6, N = 0,$$

$$(4, 4) \quad (4, 3) \quad \left\{ \begin{array}{l} (6, 3) \\ (4, 1) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} (6, 1) \\ (6, 2) \\ (3, 3) \\ (1, 2) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} (6, 6) \\ (1, 5) \\ (5, 2) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} (1, 1) \\ (5, 5) \\ (2, 2) \end{array} \right.$$

以上的仿真只给出了节点4断开的结果,其他的元件的断开情况与节点4类似,通过计算结果显示,节点4和2,支路(3,4)可以产生连锁性崩溃,而其他节点和支路则没有产生连锁崩溃。

脆性的发生和电力线路的负载状况有关。若原来电力线路的负载比较大,在承受多余的负载时,相对来说比较容易达到负载的最大值,使脆性发生的几率增大。由此定义某条线路的负载度为:

$$l_k = \frac{L_k}{L_k^{\max}} \quad (7)$$

式中,  $l_k$  为第  $k$  条线路的负载度;  $L_k$  为第  $k$  条线路的负载;  $L_k^{\max}$  为第  $k$  条线路负载的最大值。由此可知,脆性的发生与负载度成正比,负载度越大,则脆性发生的几率就越高。

## 5 结 论

电力系统的脆性分析是防止电力系统连锁性崩溃的重要方法。从仿真结果可以看出,电力系统脆性的发生有以下的特点:(1)脆性发生时大都具有从临近线路向外蔓延的特点;(2)脆性的发生和电力线路的负载状况有关;(3)并不是所有的元件都能导致脆性的发生,只有少部分元件才能激发系统的脆性。这也正是电力系统发生大停电的预兆不很明显的原因。

由以上分析可知,要防止电力系统脆性的激发,就应适当调节线路的负载,使整个系统的工作状态远离临界自组织状态;最重要的是要找出能引起连锁性崩溃的元件,从源头开始抑制电力系统脆性的激发。同时对连锁发生的轨迹要实时求取,在连锁发生的同时尽早切断连锁线路,避免事故的扩大。

### [参考文献]

- [1] 蓝毓俊. 2003年世界上几起大停电事件的经验、教训和启示[J]. 供用电, 2005, 22(1): 14-18
- [2] 闫丽梅, 金鸿章, 付光杰, 等. 复杂系统崩溃机理初探[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(5): 68-72
- [3] 金鸿章, 郭健, 韦琦, 等. 基于滑动检验法的非典型性肺炎疫情的脆性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6): 640-646
- [4] 韦琦, 金鸿章, 郭健, 等. 基于脆性的复杂系统研究[J]. 系统工程学报, 2004, 22(6): 326-329
- [5] 韦琦, 金鸿章, 郭健. 基于脆性的复杂系统崩溃的初探[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 586-589
- [6] 金鸿章, 闫丽梅, 徐建军, 等. 基于FAHP的复杂系统的脆性过程分析[J]. 系统工程, 2004, 22(6): 1-4
- [7] Dobson I, Chen J, Throp J S, et al Exam ining criticality of blackouts in power system models w ith cascading events[C]//35th Haw aii International Conference on System Sciences Haw aii Haw aii Press, 2002: 63-70
- [8] Bak P, Chen K. Self-organized criticality[J]. Scientific American, 1991, 264(1): 26-33
- [9] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1-5
- [10] Carreras B A, Newman D E. Evidence for self-organized criticality in electric power blackouts[C]//34th Haw aii International Conference on System Sciences Haw aii Haw aii Press, 2001: 4038-4045
- [11] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al Initial evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts[C]//Proceeding of the 34th Haw aii International Conference on System Sciences Haw aii Haw aii Press, 2000: 705-709
- [12] 罗春雷, 徐国禹, 孙洪波, 等. 电力系统有功静态安全域的优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1994, 6(2): 39-47

## Brittle analysis of electric power system based on self-organized criticality theory

YAN Li-mei<sup>1</sup>, XU Jian-jun<sup>1</sup>, XU Ai-hua<sup>1</sup>, LI Hong-yu<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>2</sup>

(1 Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2 Daqing Oilfield Heating and Power Plant, Daqing, Heilongjiang 163314, China)

**Abstract** Based on the theory of self-organized criticality, a brittle model of electric power system was built with the cellular automata method. By simulation of 6 nodes system, the rule of brittleness motivation was discussed. Results show that the brittleness occurrence has the characteristic of weedy from near line to outer. The happening of brittleness is related to the load condition. Only some elements can lead to the cascading collapse.

**Key words:** electric power system; brittle analysis; self-organized criticality; cascading collapse; cellular automata