

电网组织结构对其自组织临界性的影响

梁 才¹, 刘文颖¹, 温志伟², 平德明²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 甘肃电力科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 提出电力系统在运行工况下的自组织临界状态与电网结构的均匀程度有关, 并用网络拓扑熵来表征电网结构的均匀程度, 建立了自组织临界性仿真模型。通过对 IEEE39 节点系统结构改变前后的仿真验证发现: 在相同的负荷水平和线路潮流分布下, 电网结构越均匀的系统发生大规模连锁故障的概率比不均匀系统明显减低, 通过平衡电网的均匀程度能够有效降低系统进入自组织临界状态的风险。

关键词: 电网组织结构; 自组织临界性; 网络拓扑熵; 连锁故障; 停电分布

The influences of power grid structure on self-organized criticality

LIANG Cai¹, LIU Wen-ying¹, WEN Zhi-wei², PING De-ming²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Gansu Provincial Electric Power Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An original view is put forward that, under specific running state, power system self-organized criticality is related to power grid's uniform degree. The uniform degree of power network is characterized by network entropy; then a model to simulate power system self-organized criticality is proposed. Simulations in an IEEE39-bus system with the proposed model show that, under the uniform loading and flow distribution, the higher the grid's uniform degree is, the lower the probability of power cascading failure will be. Furthermore, balancing power grid's uniform degree can effectively prevent large-scale disastrous blackout and reduce the risk of entering power self-organized criticality state.

This work is supported by Gansu Provincial Natural Science Foundation of China (No.0803RJZA028).

Key words: grid's structure; self-organized criticality; network entropy; cascading failure; blackout distribution

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0006-06

0 引言

随着电网互联程度和电网规模的不断扩大, 电力系统发生连锁事故的可能性增加。近几年, 国外几个大规模互联电网连续发生了大停电事故^[1-4]。这些停电事故的共同特点是: 从某个元件断开开始, 依次引起其他元件相继断开, 最后造成大面积停电事故。这种连锁故障, 发生的概率虽然不大, 但危害极大, 因此成为国内外学者研究的热点。

随着国内外对连锁故障问题认识的不断深化, 美国的 Carreras、Dobson 等学者开始采用自组织临界理论来解释电网的连锁故障问题^[5-9]。自组织临界 (Self-organized Criticality, SOC) 理论由丹麦科学家 Per Bak 首先提出, 他指出广延耗散系统会自发

地朝着临界状态演化。在临界状态下, 外界任何微小扰动都可能引发系统一系列的灾变, 但灾变规模与灾变发生频率的关系与幂律相符 (幂律特性可用公式 $N(r) = C \cdot r^{-D}$ 表示, 将其作双对数变换后为 $\lg N = -D \lg r + C$), 此时的系统发生灾变的概率将大大提高。

电力系统是一个典型的广延耗散系统, 根据自组织临界理论和自组织临界状态的定义, 电力系统在某些特定的运行断面上应该也会呈现出幂律特性, 这是系统处于自组织临界状态的基本证据。而近年来国内、外发生大规模连锁故障机理研究表明, 电力系统发生大停电事故的发生概率与停电规模之间呈现明显的幂律分布。这正好可以解释最近国内、外大规模连锁故障频频发生的现象。为此, 国内外众多学者从不同角度研究了电网大停电的自组织临界性, 取得了许多有意义的成果。文献[10]根据电

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目 (0803RJZA028)

压/无功的关系研究了电网连锁故障演化的自组织临界性。文献[11]用连锁故障搜索法来判断电网的自组织临界状态,并分析了负荷对系统发生连锁故障的影响。文献[12]验证了系统是否处于自组织临界状态与系统的负荷水平、保护可靠性等因素有关。然而以上研究均未考虑大电网的整体特性对电力系统自组织临界性的影响,本文从电网组织结构的角度出发探索电网的组织结构与电网是否处于自组织临界状态的关系,希冀在系统总体规划上给规划人员以参考,从而减少大规模连锁故障发生的概率,降低系统进入自组织临界状态的风险。

1 电网的组织结构

自组织临界现象的一个典型范例就是沙堆模型。向一个圆盘逐粒加沙构造一个沙堆,当沙堆的倾角到达一定角度时,加入的沙粒数量与落在边缘之外的数量总体上达到平衡,沙堆停止增长。此时再对沙堆添加沙粒时,则可能触发任意大小的“雪崩”。一些学者对电力系统连锁故障和沙堆模型两者做了细致的分析和比较^[13-15],论证了电力系统连锁性大停电事故与沙堆崩塌的动力学行为具有相似性。如表1所示。

表1 电力系统和沙堆的相似性

Tab.1 Similarity between power system and sand pile		
比较项	电力系统	沙堆模型
系统状态	正常负载水平	金字塔型
驱动力	用户负荷需求	增加沙粒
缓解力	停电事故	重力作用
事件	潮流超限或元件跳闸	沙堆崩溃

有资料表明在进行水下静水和动水沙堆实验时发现,非均匀系数大的沙堆出现了自组织临界现象,而非均匀系数小的沙堆(即均匀沙堆)则没有出现自组织临界现象^[16-17]。可见,沙粒的非均匀系数是决定沙堆系统能否出现自组织临界现象的一个重要参数。非均匀系数是反映沙堆组织结构的一个参数,而在应用自组织临界理论分析实际电网连锁故障的时候,却很少关注电网的组织结构。类似地,电网组织结构可以定义为电力系统网络结构的均匀情况。电网的组织结构与自组织临界性之间存在的关系是个值得探讨的课题。如果只用一个简单的参量就可以标识电力网络的均匀情况,那么这对分析其对自组织临界性的影响将具有重要意义。

2 网络拓扑熵

2.1 电力系统的简化

在分析电力系统网络结构对电力系统是否处于

自组织临界状态的影响时,为了获取对系统总体行为的把握,需要忽略系统动态的细节场景,抽象出电网的拓扑模型。将研究对象的元素抽象为节点,将元素之间的关系抽象为网络中的边。具体构造算法如下^[18]:

① 只考虑高压输电网,不考虑配电网、发电厂和变电站的主接线;

② 高压输电线和变压器支路为网络中的边,且所有边为无向边;

③ 所有传输线的拓扑特性均被认为是相同的,不考虑输电线的各种特性参数和传输电压的不同;

④ 合并同杆并架的输电线,不计并联电容支路,即消除自环和多重边,使模型成为简单图;

⑤ 电网模型中的节点包括发电厂、变电站和变压器,不考虑大地零点,各节点被认为是无差别的节点。

2.2 网络拓扑熵

设节点 i 的度 k_i 为与该节点连接的其他节点的数目。节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越“重要”。

在热力学第二定律中,熵是表征系统无序性的度量。如果网络是随机连接的,各个节点的重要程度大致相当,这样的网络是均匀的,可以认为网络是无序的。反之,如果网络中存在极少数具有节点度高的节点和大多数节点度低的节点,节点的重要性程度存在较大差异,这样的网络是不均匀的。如果设这种网络是有序的,则在一定程度上,网络的有序与无序反映了网络拓扑的均匀程度。网络拓扑熵则可以更简洁地度量复杂网络的均匀程度。

假设网络中节点 i 的重要度 I_i 为:

$$I_i = k_i / \sum_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

它满足条件:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 1 \quad I_i > 0 \quad (2)$$

根据香农(C.E.Shannon)定理对熵的定义:对于离散变量,整个事件的不定性量度是所有可能结果的不定性量度之和^[19],给出网络拓扑熵:

$$H = - \sum_{i=1}^n I_i \ln I_i \quad (3)$$

不难证明:当网络节点边连接完全均匀,即 $I_i=1/n$ 时,网络拓扑熵最大为:

$$H_{\max} = \ln n \quad (4)$$

当网络中所有节点都与某一个中枢节点相连

时, 网络最不均匀, 网络拓扑熵最小, 即:

$$I_i = \begin{cases} \frac{1}{2(n-1)} & i=1,2,\dots,n-1 \\ \frac{1}{2} & i=n \end{cases} \quad (5)$$

可得:

$$H_{\min} = \frac{1}{2} \ln 4(n-1) \quad (6)$$

为了排除节点数目 N 对 H 的影响, 可将网络拓扑熵归一化:

$$\overline{H} = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (7)$$

3 仿真电力系统自组织临界性的模型

3.1 仿真模型流程

仿真模型是研究电力系统自组织临界性的基础。一个合格的模型应该能够准确模拟电力系统的自组织临界演化过程, 并可以仿真连锁故障的故障规模和故障概率之间的幂律特性曲线。以 OPA (为共同提出此模型的三个科研机构 ORNL、Pserc、Alaska 大学的首字母) 模型为代表, 已有的几个电力系统自组织临界性仿真模型都采用了慢动态过程和快动态过程的组合来模拟电力系统的演化。它们分别模拟连锁故障和电力系统的发展过程。本小节将要建立的模型也采用了这样的基本构架, 流程图如图 1 所示: 内层循环是快动态过程, 模拟电力系统级联故障; 外层循环是慢动态过程, 模拟电力系统负荷水平和发电水平的不断上升以及电力系统传输能力的提高。

快动态过程的基本原理是: 通过蒙特卡洛法采样得到初始故障线路, 重新生成电气数据后利用牛顿拉夫逊法计算系统的潮流分布, 接着通过一定的判据得到并依一定概率断开其中潮流越限的线路, 然后再生成新数据并计算潮流。对于孤岛, 首先计算各个孤岛的负荷和发电机容量大小, 对于负荷最大的孤岛, 通过快动态计算孤岛内被切除的负荷; 对于其他较小的孤岛, 如发电容量大于负荷, 则认为该孤岛能够就地平衡。如发电容量小于负荷, 则根据负荷和发电容量差值近似得出被切除的负荷。如此往复, 直到满足连锁故障结束条件。

慢动态过程包括两个方面:

1) 负荷水平和发电容量的增加

$$P_{di}^{k+1} = \lambda P_{di}^k; \quad P_{gi}^{k+1} = \lambda P_{gi}^k \quad (8)$$

式中: P_{*i}^k 为第 k 次循环节点 i 上的有功功率; λ 表示电力系统负荷需求的缓慢增长因子。

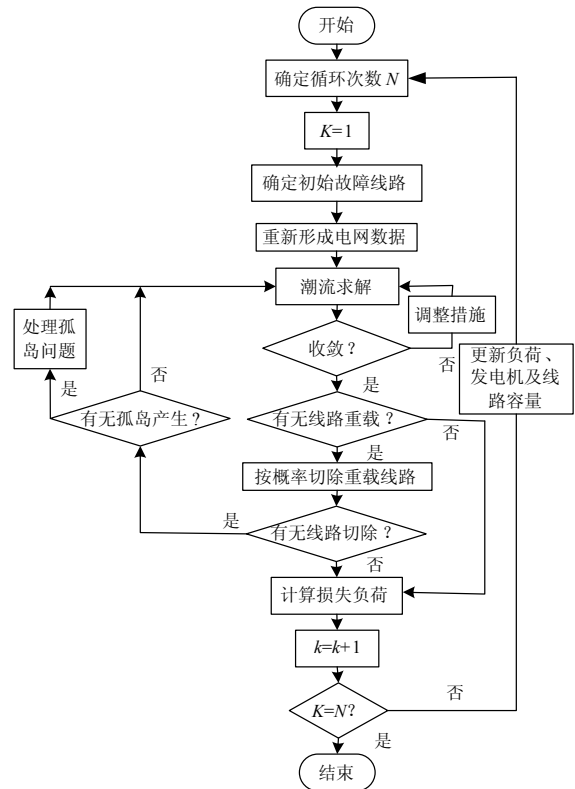


图 1 仿真模型流程图

Fig.1 Flowchart of simulation model

2) 线路容量的增加

$$F_{i,k+1}^{\max} = \mu F_{i,k}^{\max} \quad (9)$$

式中, $F_{i,k}^{\max}$ 表示线路 i 允许通过的有功潮流最大值, 如果线路不进行改造则 $\mu=1$ 。

3.2 损失负荷数的计算

本文以损失负荷数作为衡量每次连锁故障大停电事故规模指标, 某次连锁故障过程最终损失的总负荷可能包含四种类型: 1) 线路的连续开断导致给某个负荷供电的所有线路全部断开; 2) 与某台发电机相联的所有线路全被断开; 3) 系统解裂后, 为保持两个电气孤岛有功的分别平衡, 需要切机、切负荷的总量; 4) 当系统潮流计算没有可行解时, 需要通过调整系统有功输入/输出来找到新的运行点, 这时可能需要切除一部分负荷。

3.3 连锁故障结束标志

符合下列三种情况中的任何一种, 即可认为此次连锁故障结束。从故障开始到结束这段时间失去的负荷总数就是本次连锁故障大停电事故的规模。

1) 经过一系列连锁反应, 系统中没有过载线路的情况。

2) 由于故障跳开几条线路, 系统被分裂为两个电气孤岛, 这两个电气孤岛为保持各自的功率平衡, 必然要采取切机、切负荷等控制措施。这时因为注入功率、负荷等都发生了变化, 如果连续切线路过程已无法再模拟下去, 这时就认为连锁故障发展过程结束, 大停电事故发生。需要注意的是, 若连锁故障仿真过程中出现某台发电机或某个负荷与系统解裂, 首先要根据系统的静态特性来调整其他发电机和负荷的有功, 若可以达到平衡则可在重新形成系统电气数据后继续模拟连锁故障, 否则按照上述解裂的情况考虑。

3) 系统潮流计算得到的解没有物理意义或经调整措施仍不收敛时, 认为系统失去稳定运行点, 大停电事故发生, 连锁故障过程结束。

4 算例分析

在 visual C++平台按要求编写仿真连锁故障程序后, 选用 IEEE39 节点数据考察在不同网络结构下连锁故障规模与概率分布曲线。IEEE39 节点系统包括 10 台发电机, 39 条母线和 33 条线路, 其网络接线图如图 2 所示。

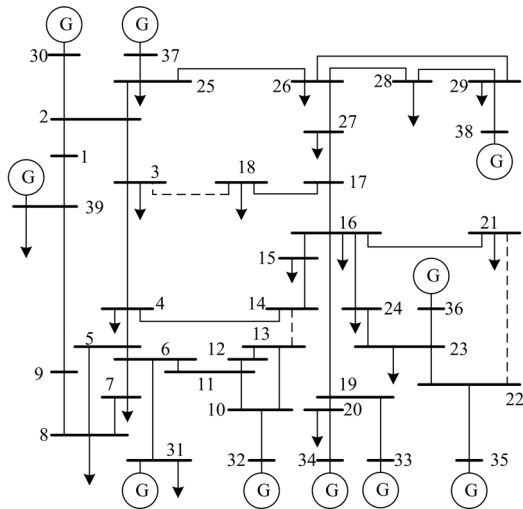


图 2 IEEE39 节点网络接线图

Fig.2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

表 2 给出了 IEEE39 节点系统在某一负荷水平和线路潮流分布下, 进行 200 次连锁故障仿真得出的统计数据。

将表 2 中的数据对应各点绘于双对数坐标图中, 可以得出连锁故障规模概率分布曲线, 如图 3 中曲线 1 所示。图中的 x 轴为每次故障后损失负荷量的对数坐标 (即 $x = \log r$, r 为损失负荷), y 为大于 x 的切负荷量的次数/总的循环次数的对数坐标

(即 $y = \log N$, N 为累积概率)。

表 2 系统结构改变前停电规模概率数据统计

Tab.2 Statistics of blackout scale vs probability before system structural change

损失负荷/MW	发生频度	累积频度	累积概率
≥ 100	9	89	0.445
≥ 200	9	80	0.4
≥ 300	23	71	0.355
≥ 400	26	48	0.24
≥ 500	16	22	0.11
≥ 600	5	6	0.03
≥ 700	1	1	0.005
≥ 800	0	0	—

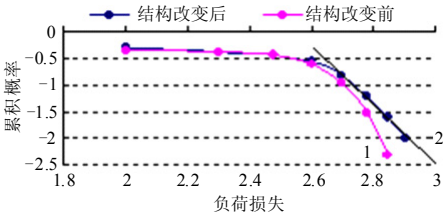


图 3 在相同负荷水平和不同网络拓扑熵下的故障概率分布

Fig.3 Distribution plot of blackout scale vs probability with different network entropy and uniform loading

由曲线 1 可以看出, 大规模停电事故发生的可能性并不是逐渐或呈线性增加的, 而是有一个迁跃点, 当大停电事故规模超过这个迁跃点后, 其发生的概率将骤然降低。

已有文献指出, 电网的负荷水平和线路潮流分布水平都是决定电力系统是否处于自组织临界状态的因素^[20]。为排除以上两因素对仿真结果的影响, 在保持系统负荷水平和线路潮流分布不变的前提下 (可通过将电网中各条线路允许通过的有功潮流最大值乘以不同系数的方法), 改变 IEEE39 节点系统的系统结构, 断开如图 2 所示的三条线路。这时系统结构的均匀程度将发生改变, 系统结构改变前后 IEEE39 节点系统网络拓扑熵的比较如表 3 所示。

表 3 IEEE39 节点改变结构前后网络拓扑熵比较

Tab.3 Comparison of two different networks

	H	\overline{H}
结构改变前	1.551	0.920
结构改变后	1.473	0.763

对改变结构后的系统进行连锁故障仿真得到的停电规模概率统计数据如表 4 所示。

表 4 系统结构改变后连锁故障数据统计

Tab.4 Statistics of blackout scale vs probability after system structural changed

损失负荷/MW	发生频度	累积频度	累积概率
≥100	13	96	0.48
≥200	11	83	0.415
≥300	17	72	0.36
≥400	25	55	0.275
≥500	18	30	0.15
≥600	7	12	0.06
≥700	3	5	0.025
≥800	2	2	0.01

将表 4 中数据绘于双对数坐标图中, 得到改变系统结构后连锁故障规模概率分布曲线, 如图 3 中曲线 2 所示。由图 3 可以看出, 在系统结构发生改变后, 连锁故障导致大停电规模与相应的概率曲线负荷损失约 2.6 点后呈现明显的幂律特性, 利用最小二乘法对大停电发生概率进行线性回归 (如图 3 中直线所示), 可得到此幂率特性拟合直线为:

$$\lg N = -Dlgr + C = -5.88lgr + 9.172$$

其中: r 为事故负荷损失数 (MW); N 为该事故损失负荷数出现的概率。

由此可知, 在负荷损失超过 2.6 这个临界点后系统将进入自组织临界状态, 在这种状态下其发生大规模连锁故障的概率将大大增加。如果在事故发展初期及时采取措施将系统故障规模控制在临界点以内, 可以提前阻止系统进入自组织临界状态防止大停电事故发生。对比两条曲线可以看出, 网络拓扑熵越小, 电网在发生故障后越容易进入自组织临界状态; 网络拓扑熵越大其发生大规模连锁故障的概率越低, 并且故障规模与概率之间幂率关系明显减弱。由此可以推断: 电力系统是否处于自组织临界状态与网络拓扑的均匀程度有很大的关系。同样的负荷水平和线路潮流分布下, 网络结构越均匀其发生大规模连锁故障的概率越低; 同时考虑到连锁故障的特点, 当某元件故障断开导致其他线路或元件过载相继断开的情况, 对网络结构的均匀性也是相当不利的冲击, 在一定程度上对连锁故障的发展起到了推波助澜的作用。对于规划人员来说, 新增的线路和厂站应尽量保证网络结构的均匀分布, 可以有效降低系统发生连锁故障的概率和进入自组织临界态的风险。

5 结语

本文引入网络拓扑熵的概念表征电网结构的均

匀程度。通过实例仿真验证了电网组织结构对当前系统是否处于自组织临界状态的影响, 实例验证发现: 在相同的负荷水平和线路潮流分布情况下, 电网结构越不均匀, 系统越容易达到自组织临界态。需要指出的是本文提出的模型还存在一些不足, 如线路隐藏故障、发电机及负荷动态等因素均未考虑。对实际电网宏观发展中体现的自组织临界性有待进一步研究。

参考文献

- [1] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术, 2003, 27(9): T1.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-12.
YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power Systems Technology, 2003, 27(10): 8-12.
- [3] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-5.
- [4] 刘鹏, 吴刚. 世界范围内两起典型电压崩溃事故分析[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 35-37.
LIU Peng, WU Gang. Analyses of two typical voltage collapse incidents worldwide[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 35-37.
- [5] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts[C]. //Hawaii International Conference on System Science. Hawaii: 2000.
- [6] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts[C]. //Hawaii International Conference on System Science. Hawaii: 2001.
- [7] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts[C]. //Hawaii International Conference on System Science. Hawaii: 2001.
- [8] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A probabilistic loading dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]. //Hawaii International Conference on System Science. Hawaii: 2003.
- [9] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A branching process approximation to cascading load-dependent system failure[C]. //35th Hawaii International Conference on System Science. Hawaii: 2004.
- [10] 王刚, 梅生伟, 胡伟. 计及无功/电压特性的停电模型

- 及自组织临界性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1): 9-13.
- WANG Gang, MEI Sheng-wei, HU Wei. Blackout model with reactive power and voltage and its self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (1): 9-13.
- [11] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 用连锁故障搜索算法判别系统的自组织临界状态[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 1-5.
- YI Jun, ZHOU Xiao-xin, XIAO Yu-nan. Determining the self-organized criticality of power systems by the cascading failures searching method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (25): 1-5.
- [12] 梅生伟, 翁晓峰, 薛安成, 等. 基于最优潮流的停电模型及自组织临界性分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (13): 1-5.
- MEI Sheng-wei, WENG Xiao-feng, XUE An-cheng, et al. Blackout model based on OPF and its self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (13): 1-5.
- [13] CARRERASBA, NEWMANDE, DOBSONI, et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power blackouts[EB/OL]. [http : //ecserv0. ece. wisc. edu/~dobson/PAPERS/carrerasHICSS00.pdf](http://ecserv0.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/carrerasHICSS00.pdf).
- [14] 丁明, 韩平. 基于复杂系统理论的电网连锁故障研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28 (9): 1047-1052.
- DING Ming, HAN Ping-ping. Research on power system cascading failure with complex system theory[J]. Journal of Hefei University of Technology: Science Natural, 2005, 28 (9): 1047-1052.
- [15] 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.
- CAO Yi-jia, JIANG Quan-yuan, DING Li-jie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29 (15): 1-5.
- [16] 李远富, 姚令侃, 邓域才. 单面坡沙堆模型 SOC 研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35 (2): 121-125.
- LI Yuan-fu, YAO Ling-kan, DENG Yu-cai. Experimental study on the self-organized criticality of sand pile model with one-grade slop[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35 (2): 121-125.
- [17] 韦方强, 何易平, 胡凯衡, 等. 溜砂坡遥感解译标志与方法[J]. 自然灾害学报, 2002, 11 (4): 124-128.
- WEI Fang-qiang, HE Yi-ping, HU Kai-heng, et al. Remote sensing interpretation of sliding sand slope[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11 (4): 124-128.
- [18] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
- MENG Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [19] 王西明. 从熵、信息熵到自组织[J]. 现代物理知识, 2008, 15 (4): 6-7.
- WANG Xi-ming. From entropy, information entropy to self-organized[J]. Modern Physics, 2008, 15 (4): 6-7.
- [20] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 电力系统自组织临界特性分析与仿真模型[J]. 电网技术, 2008, 32 (3): 7-12.
- YI Jun, ZHOU Xiao-xin, XIAO Yu-nan. Analysis on power system self-organized criticality and its simulation model[J]. Power System Technology, 2008, 32 (3): 7-12.

收稿日期: 2009-11-05; 修回日期: 2010-04-07

作者简介:

梁 才 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: liangcai00168@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [10] Arroyo J, Barocio E, Betancourt R, et al. A bilinear analysis technique for detection and quantification of nonlinear modal interaction in power systems[C]. //IEEE Power Engineering Society. Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal (Canada): 2006.
- [11] 史荣昌. 矩阵分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- SHI Rong-chang. Matrix analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [12] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44 (7): 883-887.
- XIAO Jin-yu, XIE Xiao-rong, HU Zhi-xiang, et al. Improved Prony method for online identification of low-frequency oscillations in power system[J]. Journal of Tsinghua University: Sci&Tech, 2004, 44 (7): 883-887.

收稿日期: 2009-11-01; 修回日期: 2009-12-01

作者简介:

王宇静 (1978-), 女, 博士研究生, 主要从事基于广域测量的电力系统稳定与控制方面的研究; E-mail: wyjhit@gmail.com

于继来 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究。