

具有不同拓扑特征的中国区域电网连锁故障分析

易俊, 周孝信, 肖逾男

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 为了得出小世界网络特性对电网发生连锁故障的影响, 文中对几个具有小世界特征的电网和几个具有随机网络特征的电网进行了仿真分析, 结果发现无论是具有小世界网络特征的电网还是具有随机网络特征的电网, 在一定的条件下都表现出自组织临界性, 即发生连锁故障的“故障规模-故障概率”分布曲线呈现出幂律特征。

关键词: 中国区域电网; 连锁故障; 小世界网络特性; 随机网络特性

中图分类号: TM711

0 引言

目前, 利用复杂网络理论从网络结构层面上分析故障在电网中的连锁传播是电网连锁故障研究的一个热点, 这其中大多又以小世界网络模型为研究的立足点。

小世界网络模型由 Watts 和 Strogatz 于 1998 年提出, 是介于规则网络和随机网络之间的网络模型。Watts 在文献[1]中得出了美国西部电网是一个小世界网络的结论。Surdutovich 对巴西电网进行了分析[2], 证明其具有小世界特性。有学者也对中国电网进行了类似的分析[3], 结果发现, 中国电网也是一个“小世界网络”。由此, 研究者们希望能够通过研究小世界网络, 发现它的某些特性, 尤其是故障在这种网络中的传播机理, 从而为电网连锁故障的研究提供借鉴作用。文献[3]认为: 由于聚类系数对应着故障传播的广度, 特征路径长度代表着故障传播的深度——故障在网络中传播的深度随着特征路径的减小而增大, 所以小世界网络所特有的较小特征路径长度和较高聚类系数等特性(即大的深度和宽的广度), 将对故障的传播起到推波助澜的作用, 故障在小世界网络中的传播速度和影响范围将大大高于相应的规则网络和随机网络。文献[4]利用基于小世界拓扑模型的电网脆弱性评估算法模拟了电网对随机故障和“蓄意攻击”的耐受性, 得到的结论表明, 连锁故障对具有小世界特性的电网的影响相对于对具有随机网络特性的电网来说更大一些。上述研究利用自定义的简单的网络规则对连锁故障进行计算分析(下文称其为自定义网络规则法, 简称网

络法), 得出了相应的结论, 具有一定的指导意义。但其缺点在于没有真正加入电力系统所具有的电电压等基本电气量, 分析仍然过于简单。因此, 本文希望利用真实的电力系统进行进一步的分析, 得到某些更加贴近真实电网的结论。

1 小世界网络模型

小世界网络是一种介于规则网络和随机网络之间的网络模型。它与规则网络以及随机网络的关系参见文献[3]。

平均距离(L)和聚类系数(C)是各种不同网络的 2 个重要测度, 分别表征了网络中任意 2 点间的距离以及相邻节点间相互联系的紧密程度。它们可以被用来区分各种不同的网络。

因为小世界网络的特点是平均路径短但聚类系数大, 而随机网络的特点是平均路径短且聚类系数小, 所以可以用下式来判断网络是否具有小世界特性[3]:

$$C \gg C_{\text{random}} \quad (1)$$

$$L \geq L_{\text{random}} \quad (2)$$

式中: C_{random} 指与小世界网络具有相同节点数和相同平均度数的随机网络的聚类系数; L_{random} 指与小世界网络具有相同节点数和相同平均度数的随机网络的平均距离。 C_{random} 和 L_{random} 的计算方法和详细计算过程参见文献[5]。

根据目前小世界网络的定义, 要对实际电网进行研究必须先对电网拓扑数据进行简化, 将实际电网的数据简化成简单、无权、无向的连通图后再进行小世界特征分析。

2 连锁故障仿真模型简介

本文采用了基于直流潮流的连锁故障仿真模

型,基本原理是:通过蒙特卡罗法采样得到初始故障线路,重新生成电气数据后利用直流潮流法计算系统的潮流分布,接着通过一定的判据来得到并断开其中潮流越限或发生了保护隐藏故障的线路,然后再生成新数据并计算潮流,如此往复,直到满足仿真中止条件为止。模型的具体介绍见文献[6]。

3 仿真过程及结果

3.1 电网的拓扑结构及特征分析

本文从我国电网中选取了4个区域电网来进行分析,分别是华北电网、东北电网、川渝电网和广东电网,其中华北电网和东北电网为2005年运行数据、川渝电网和广东电网为2006年运行数据。对上述电网按第2节所述的原则进行简化后计算得到4个特征参数,结果见表1。

表1 电网特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the 4 power systems

电网	节点数	边数	C	L	C _{random}	L _{random}
华北	1 620	1 846	0.015 22	14.897 6	0.001 407	8.971 5
东北	876	1 088	0.049 59	11.666 6	0.002 836	7.446 5
川渝	759	831	0.005 39	12.034 0	0.002 885	8.461 6
广东	1 126	1 229	0.003 89	12.653 6	0.001 939	9.000 4

根据式(1)和式(2)并对比表1中的数据可以断定,华北电网和东北电网均属于小世界网络,但川渝电网和广东电网则更接近于随机网络。同时,在对应故障传播广度的聚类系数指标上有如下关系:东北电网>华北电网>川渝电网>广东电网。

3.2 连锁故障仿真分析

从上述的4个区域电网中选取华北电网和广东电网进行仿真分析。仿真采用了第2节所述的连锁故障模型。图1给出了这2个电网在给定的运行状态下发生连锁故障的规模与对应的累积概率的双常用对数坐标曲线。

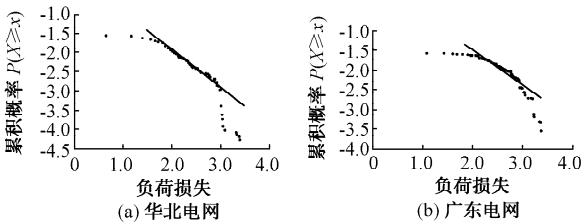


图1 华北电网及广东电网故障规模概率分布曲线
Fig.1 Probability distribution function of blackout scales for the North China power grid and Guangdong power grid

因为华北电网的总负荷约为46 084.86 MW,而广东电网的总负荷约为37 133.75 MW,为了便于比较,图1(b)中的负荷损失数据为仿真计算得到

的数据乘以 α ($\alpha=46\,084.86/37\,133.75$)后再求常用对数得到的值,下文的仿真数据均进行了相同的处理。从图1可以看出,不论是具有小世界特性的华北电网还是具有随机网络特性的广东电网,当负荷损失约为100 MW~1 000 MW(对应图中的横坐标为2~3)之间时,其连锁故障规模概率分布曲线都呈现明显的幂律特性,且斜率相差也很小,均约等于1。也就是说,在这2个网络的当前运行方式下,发生大规模连锁故障的风险程度大体相同,华北电网的小世界特性并没有增加其发生连锁故障的风险。

3.3 自组织临界特性分析

根据复杂系统理论,电力系统这样的广延耗散系统随着时间的推移将会逐渐演变达到自组织临界状态。此时,任意一个小扰动都有可能造成事故的连锁反应而导致非常大的损失。自组织临界状态的一个重要特征是在这个系统上发生的故障的规模和对应的累积概率之间呈现幂律特性。目前,已有学者对北美电力系统及我国电力系统的历史事故数据进行了统计分析,发现了这种幂律特性^[7-9]。在此,我们将在上述4个电网中对这种演化过程进行模拟,利用得到的数据分析电网的小世界特性是否会对这种演化造成影响。

最优潮流方法(OPA)模型由美国橡树岭国家实验室、威斯康星大学电力系统工程研究中心和Alaska大学的多位研究人员共同提出^[10]。它可以较好地模拟电网的自组织临界演化过程,得出的结果符合幂律特性这一自组织临界状态的基本特征。目前,在这方面的研究中,OPA模型被引用得最多。因此,在第2节所述的仿真模型中加入了类似OPA模型的慢速演变过程后对4个区域电网进行了仿真计算。

3.3.1 电网在长期发展过程中呈现出的幂律特性

图2是负荷日增量乘子 λ 为1.000 05,线路改善乘子 μ 为1.005时的仿真结果, λ 和 μ 的意义见文献[10]。图中采用双常用对数坐标, λ 和 μ 的取值与文献[10]相同, λ 等于1.000 05相当于年负荷增量约2%。

从图2可见,在华北、东北、川渝和广东4个电网中,故障发生规模和其对应的累积概率间都呈现出明显的幂律特性。斜率大概在-2~-1之间。

我国近20年来国民生产总值的年增长率约为9%,负荷的年增长百分数通常稍大于国民经济增长的百分数,因此,为了更符合我国电网的实际情况,把 λ 设为1.000 261,对应年负荷增量约为10%,相应的 μ 设为1.026 1。图3给出了仿真结果,图中采用双常用对数坐标。

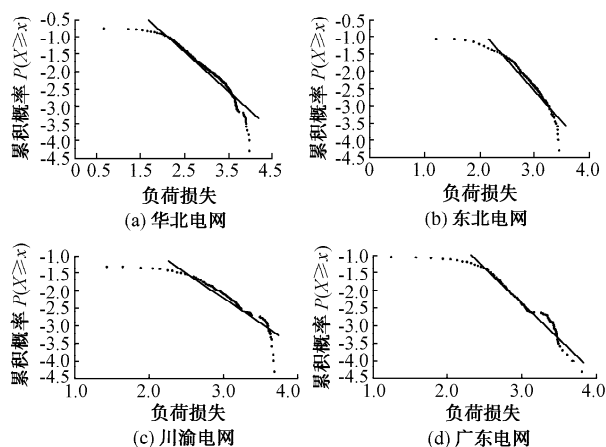


图2 4个区域电网长期发展过程中的故障规模概率分布曲线($\lambda=1.000\ 05$)

Fig. 2 Probability distribution function of blackout scales for the four regional power grids in a period of time ($\lambda=1.000\ 05$)

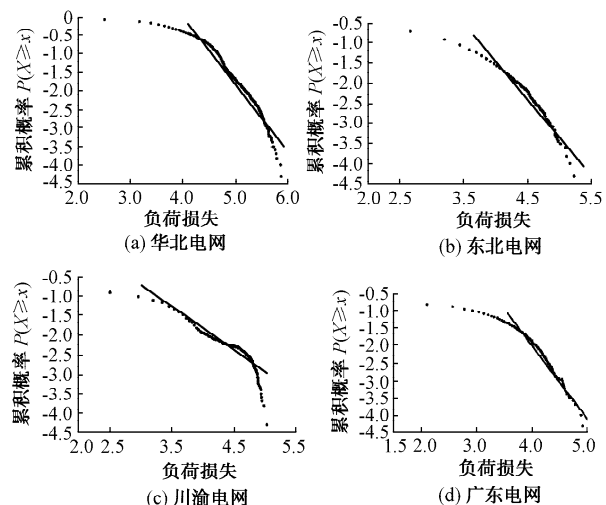


图3 4个区域电网长期发展过程中的故障规模概率分布曲线($\lambda=1.000\ 261$)

Fig. 3 Probability distribution function of blackout scales for the four regional power grids in a period of time ($\lambda=1.000\ 261$)

与图2相似,图3的曲线也呈现出明显的幂律特性,斜率同样大概在 $-2 \sim -1$ 之间。

3.3.2 电网发展过程中某一断面呈现的幂律特性

根据自组织临界性的定义,电网在发展过程中将逐渐趋近于自组织临界状态,因此,在对电网进行慢速演变模拟时,模拟一段时间后电网在某一个特定的模拟断面上可能会呈现出自组织临界特性。为了验证这一理论,在华北、东北、川渝和广东电网上进行了如下仿真计算:首先对电网进行与3.3.1节相同的计算(λ 设为 $1.000\ 261$, μ 设为 $1.026\ 1$),在计算了 $20\ 000\ d$ 后,电网负荷不再增长,线路有功上限不再增加。然后,针对得到的电网数据再用第

2节所述的连锁故障模型进行计算。得到的结果见图4,图中均采用双常用对数坐标。

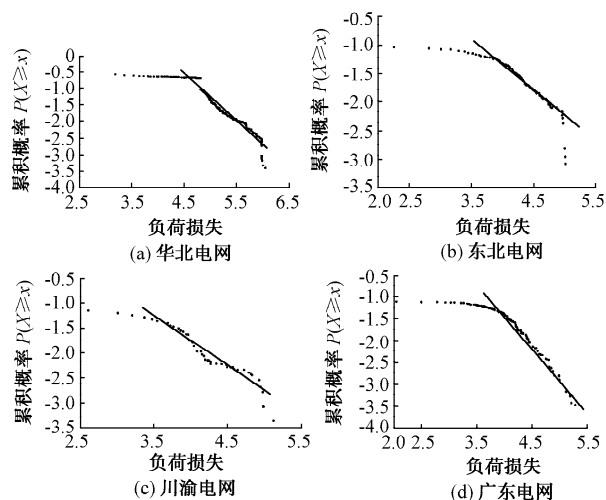


图4 4个区域电网某一运行断面下的故障规模概率分布曲线

Fig. 4 Probability distribution function of blackout scales for the four regional power grids in a given operating state

可以看出,图4中的曲线呈现出明显幂律特征,斜率大概在 $-1.5 \sim -1$ 之间。

由此可知,不论是具有小世界特性的电网还是具有随机网络特性的电网,在系统发展的某个断面上都可能处于自组织临界状态。此时,其发生大规模连锁故障的概率很高。

3.4 仿真结果简介

从上述仿真结果可以看出,不论是具有小世界特征的华北电网和东北电网还是具有随机网络特征的川渝电网和广东电网,其发生大规模连锁故障的概率都不能忽略,在某些运行状态下,它们发生连锁故障的规模分布曲线都可能呈现幂律分布。同时,通过对电网发展过程的模拟可知,具有小世界特征的华北电网和东北电网以及具有随机网络特征的川渝电网和广东电网在自组织临界演化过程中表现出的特性也相似。总之,上述仿真分析得出的结果是具有小世界特征的华北电网和东北电网相对于具有随机网络特征的川渝电网和广东电网而言,发生连锁故障的风险并没有增加。

4 结语

本文从不同的角度对我国的4个区域电网进行了连锁故障仿真分析,得出了与已有的网络法不一致的结果。出现这样结果的原因可能以下几点:

1)现有的网络法做了许多假定,这些假定中的相当一部分与电力系统的实际情况并不相符。将电网简化为无向、无权的简单网络的方法可能忽略掉

某些与电网发生连锁故障密切相关的信息。

2)高聚类系数意味着相邻节点间的联系紧密(互相连接的边多)。这样,当网络中某个节点发生事故时就有可能将事故传播给更多的节点。这种想法对于研究类似传染病在人类中的传播这样的题目是非常直观且恰当的。但电网的情况与它有些不同,在电网中,线路(即网络中的边)是负荷的载体,线路过载跳闸后并不一定会通过相互之间的联系点(母线)将负载转移到相邻线路上去(除双回输电线以外)。实际情况是,某条线路过载跳闸,可能会引起与它相距非常远的线路潮流大幅增加而过载。因此,电网的聚类系数高是否就意味着连锁故障的传播广度大还需要进一步研究。

目前从电网的结构特性上对电网的连锁故障进行研究还处于初级阶段,还有许多问题没有解决,存在局限性。而本文应用的方法也没有考虑电压和电网动态过程的影响,对连锁故障的过程做了简化。因此,未来在这2方面都需要进一步研究。

此外,本文中并没有考虑规则网络的情况,这是因为在实际电网中没有找到具有规则网络特性的电网。同时,由于规则网络要求每个节点的度数相同,而根据电力系统的特点,不可能出现具有规则网络特征的实际电网。

参考文献

- [1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small world" networks. *Nature*, 1998, 393(6): 440-442.
- [2] SURDUTOVICH G, CORTEZ C, VITILINA R, et al. Dynamics of "small world" networks and vulnerability of the electric power grid// *Proceedings of VIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, May 19-23, 2002, Brasilia, Brasil.
- [3] 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. *电力系统自动化*, 2004, 28(15): 21-29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(15): 21-29.
- [4] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算

法. *电力系统自动化*, 2006, 30(8): 7-10, 40.

- DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(8): 7-10, 40.
- [5] WATTS D J. *Small worlds—the dynamics of networks between order and randomness*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1998.
- [6] 易俊,周孝信.考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型. *电力系统自动化*, 2006, 30(14): 1-5.
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A cascading failure model of power system considering frequency response characteristics and hidden failures. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(14): 1-5.
- [7] CHEN Jie, THORP J S, PARASHAR M. Analysis of electric power system disturbance data// *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan 3-6, 2001, Maui, HI, USA. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2001: 738-744.
- [8] 于群,郭建波.我国电力系统停电事故自组织临界性的研究. *电网技术*, 2006, 30(6): 1-5.
YU Qun, GUO Jianbo. Study on self-organized criticality of power system blackouts in China. *Power System Technology*, 2006, 30(6): 1-5.
- [9] 于群,郭建波.中国电网停电事故统计与自组织临界性特征. *电力系统自动化*, 2006, 30(2): 16-21.
YU Qun, GUO Jianbo. Statistics and self-organized criticality characters of blackouts in China electric power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(2): 16-21.
- [10] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts// *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan 3-6, 2001, Maui, HI, USA. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2001: 710-718.

易俊(1980—),男,博士研究生,从事大电网安全运行等方面的研究工作。E-mail: xih-yjun@163.com

周孝信(1940—),男,中国科学院院士,长期从事电力系统分析与控制方面的研究。

肖逾男(1979—),女,硕士,主要从事电力电子方面的研究工作。

Analysis on Cascading Failures in Several Chinese Regional Power Grids with Different Network Characteristics

YI Jun, ZHOU Xiaoxin, XIAO Yunan

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: For the sake of determining the impact of small-world property on probability of occurring cascading failures in power systems, the cascading failures are simulated in several power systems among which some have small-world property and the others have stochastic network property. The result shows that power systems with either small-world property or stochastic network property will both indicate self-organized criticality under specific conditions, that is, the blackout sizes show a power law distribution.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217900).

Key words: Chinese regional power grids; cascading failures; small-world property; stochastic network property