

濮阳配电网故障的自组织临界性及其诱因

晁岱峰¹, 杨军选², 苏盛³, 石东源³

- (1. 蒙东电力公司, 辽宁省 沈阳市 110180; 2. 濮阳供电公司, 河南省 濮阳市 457000;
3. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Self-organized Criticality and Its Cause of Faults in Puyang Distribution System

CHAO Daifeng¹, YANG Junxuan², SU Sheng³, SHI Dongyuan³

- (1. East Inner Mongolia Electric Power Company, Shenyang 110180, Liaoning Province, China; 2. Puyang Power Supply Company, Puyang 457000, Henan Province, China; 3. College of Electrical & Electronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The information on faults occurred in Puyang distribution network is extracted, and analysis results of the information shows that the time series of faults possess evident long-term self-correlation and its probability distribution shows up power-law distribution characteristics, so the faults occurred in Puyang distribution network possess self-organized criticality (SOC). Weather factor greatly influences on faults of distribution network, and according to the analysis of the fault causes it is found that the SOC of precipitation phenomena in atmosphere system is the determinative factor of SOC of faults occurred in distribution network of this region.

KEY WORDS: distribution network fault; extreme climate; long term correlation; self-organized criticality

摘要: 提取了濮阳配电网故障信息, 故障分析结果表明其在时域上具有明显的长程自相关性和幂律分布特性, 因此濮阳配电网故障具有自组织临界性。天气因素对电网故障影响较大, 分析濮阳配电网故障原因后发现, 大气系统中降水现象的自组织临界性是该地区配电网故障自组织临界性的决定因素。

关键词: 配电网故障; 极端天气; 长程自相关性; 自组织临界性

0 引言

电网故障的统计分布特性是进行电力系统可靠性分析的重要基础。文献[1]对我国温州和长沙电网的故障数据进行了统计分析, 发现温州和长沙电

网故障在时域上具有幂律分布特性。而经典可靠性理论认为输配电线路、变压器及断路器等一次设备元件的失效事件可用泊松分布描述, 元件失效事件之间相互独立, 由多个元件构成的电网在单位时间内发生故障的次数应具有指数分布规律^[2-4]。

近年来世界范围内频繁发生的大面积停电事故是当前的研究热点, 国内外科研人员研究后发现大停电事故中输电线路的跳闸次数、失负荷数、失电用户数和电量损失等大规模停电指标普遍具有自组织临界性^[4-7]。处于临界状态下的电网, 初始故障后线路潮流的大规模转移和继电保护的不恰当动作是触发连锁故障、使大停电具有自组织临界性的直接原因^[8-11]。配电网一般采用开环运行方式, 线路故障后, 调度运行人员先进行故障选线和定位, 再对停电线路的无故障区段执行倒闸操作, 最后恢复供电, 由潮流转移引发连锁故障的概率极低, 这显然不是配电网故障具有幂律分布的根本原因。

为研究电网故障统计分布特性及其形成机制, 文献[12-13]对我国南方4个省市电网故障分析后发现, 其电网故障普遍具有自组织临界性, 具有幂律分布特点。虽然大停电事故一般都伴随有大量故障, 但电网故障和电网大停电的自组织临界性是2个相互关联而又有所区别的概念, 如我国的大停电事件大多以拉闸限电的形式出现, 但并不伴随有大量的电网故障, 而对于一个结构坚强的电网, 即便发生大量故障, 也不一定会直接影响用户供电^[12]。文献[12-13]还指出, 所调研电网的故障在具有自组织临界性的极端天气及其相关事件^[14-19]作用下具

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907005); 中国博士后科学基金项目(20090460930); 国家电网公司科学技术项目(SGKJJSKF[2008]469)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907005); China Postdoctoral Science Foundation (20090460930); Science and Technology Foundation of the State Grid Corporation of China(SGKJJSKF[2008]469).

有自组织临界性,服从幂律分布,2008年冰灾中电网故障数据表明,该推断能合理解释冰灾中电网故障大量爆发的现象。

值得指出的是,文献[12-13]所调研的几处电网均处于我国南方沿海和丘陵地带,易受雷雨、台风等极端天气侵袭。本文将在整理濮阳配电网故障数据后,分析其统计分布特性,以探明电网故障在极端天气作用下具有自组织临界性的推断是否也适用于处于其他气候带的电网。

1 濮阳配电网故障

濮阳位于中纬地带,常年受东南季风环流的控制和影响,属暖温带半湿润季风型大陆性气候,特点是四季分明,春季干旱多风沙,夏季炎热雨量大,秋季晴和日照长,冬季干旱少雨雪。濮阳地势平缓,无山地丘陵,飞尘少,由绝缘子污秽导致的电网故障少有发生,濮阳城市绿化面积覆盖率达40.1%,由树枝碰触导致的电网故障较为突出。濮阳供电公司在电网规划方面,充分考虑了市内送电走廊树木丛生的特点,选用了适合林区的集束型架空绝缘导线,极大降低了电网故障率。尽管濮阳地区为北方内地城市,极端天气发生的概率少于文献[12-13]分析的南方沿海及丘陵地域,但濮阳配电网也存在恶劣天气下故障大量发生的现象^[20]。

作者从2006年2月28日至2008年12月31日期间的运行日志中提取了濮阳配电网10kV系统的日故障数据,总调查期为1058d,期间共有252次故障,日均故障为0.2395次,调查期内日故障情况如图1所示。

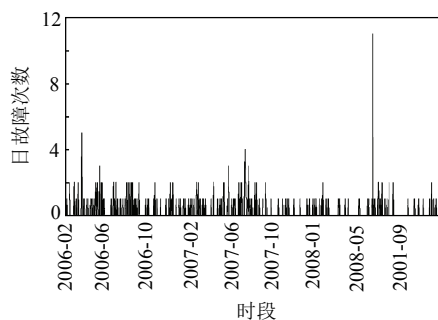


图1 濮阳配电网故障

Fig. 1 Fault of Puyang distribution network

由图1可知,濮阳配电网故障具有一定的周期性,故障高峰集中出现在每年的春季和夏季的雷雨时节。

2 濮阳配电网故障的自组织临界性

Hurst 指数(H)是分析时间序列是否具有长程自

相关的指标^[21],其具体计算步骤参见文献[13]。 $H=0.5$ 表明信号为白噪声; $H>0.5$ 表明信号具有长程自相关性; $H<0.5$ 则表明信号具有反相关性。

由于时间序列中存在大量随机干扰,为避免干扰影响,文献[22]提出了去势涨落分析法计算电网故障的Hurst指数,经计算,濮阳配电网故障的Hurst指数为0.6686,即 $H>0.5$,因而濮阳配电网故障具有长程自相关性,这与图1中电网故障在时域上的周期性特征是吻合的。

经典可靠性理论在分析多元件系统时,先将所研究系统进行分解,然后分别研究各元件的故障机制,统计各元件故障数据并给出其平均故障概率,最后将多个元件综合起来分析系统整体的可靠性。经典可靠性理论一般认为输配电线路、变压器及断路器等一次设备元件的失效事件可以用泊松分布来描述。如果元件失效事件之间相互独立,对由多元件构成的电网而言,单位时间内发生故障的次数应具有指数分布特点。而实际电网故障事件之间并不是相互独立的,如恶劣天气下大量发生的电网故障事件具有突出的相关性。研究人员很早已认识到电网设备失效事件服从泊松分布假设的局限性^[20],提出了考虑多种气候状态的可靠性模型,并进行了仿真分析,仿真结果表明不考虑天气影响的可靠性分析结果偏于乐观^[20,23-24]。

在具有自组织临界性且强度服从幂律分布的极端天气及其相关事件作用下,输配电网故障在时域上均有可能服从幂律分布^[25]。电网日故障次数 X 大于某一数值 x 的概率 P 为

$$P(X>x)=cx^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: c 为常数; α 为幂指数;

对式(1)两边取对数,可得

$$\lg[P(X>x)]=\lg c-\alpha \lg x \quad (2)$$

濮阳配电网日故障概率如图2所示,经计算得

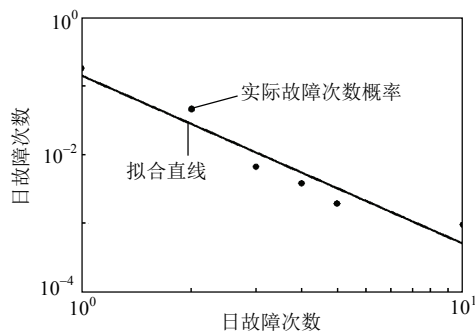


图2 濮阳配电网故障概率

Fig. 2 Fault probability of Puyang distribution network

幂指数 α 为 2.354 8，配电网故障概率分布曲线在双对数坐标下呈直线分布，因此可推断濮阳配电网故障具有幂律分布特性。具有自组织临界性的标志为具有长程自相关性和幂律分布特性。由以上分析可知，濮阳配电网故障在时域上具有长程自相关性，且服从幂律分布，因此可判定其具有自组织临界性。

3 濮阳配电网故障自组织临界性引发原因

为确定濮阳配电网故障是否在具有自组织临界性的极端天气作用下具有自组织临界性，需要分析濮阳配电网故障的引发原因。现有研究认为电网大停电时初始故障后的潮流转移及继电保护的隐性故障是其具有幂律分布的关键因素，然而这并不是濮阳配电网故障在时域上具有自组织临界性的原因。配电网采用开环运行方式，线路故障后不存在潮流转移引起的潮流越限和保护误动。由濮阳配电网故障次数最多日的故障原因中也无法确定潮流转移及继电保护的误动与拒动在引发配电网故障中的作用，因此不能将濮阳配电网故障的自组织临界性归结为由连锁故障引起。

为深入分析电网故障自组织临界性的机制，对电网日故障次数降序排列后取日故障次数 ≥ 4 的 4 条记录，其时间和故障原因如表 1 所示，查询后发现故障发生当时濮阳地区的天气情况都是得到媒体关注的主要气候事件。

表 1 故障信息

Tab. 1 Information of fault

日期	故障数	主导原因	气候事件强度
2008-06-25	11	风雹	2008 年 6 月全国主要气候事件
2006-03-27	5	沙尘暴	河南省 2006 年 10 大气候事件
2007-06-30	4	暴雨	河南省 5 a 间“天气之最”
2007-07-01	4	暴雨	河南省 5 a 间“天气之最”

由表 1 可知，濮阳配电网故障最多日的故障原因均系雷雨大风等恶劣天气。由于大气降水及其相关事件均具有自组织临界性，因而可以将电网故障具有自组织临界性的原因归结于大气系统中降水现象的自组织临界性。为进一步明确极端天气事件对濮阳配电网故障的影响，总结了包含和不包含(剔除故障数据中日故障次数 ≥ 4 的 4 个故障日数据)极端天气影响的 2 组电网故障数据统计分布特性，如图 3 所示。

由图 3 可知，排除极端天气影响后，电网日故障次数概率在单对数坐标下呈直线分布，如同经典

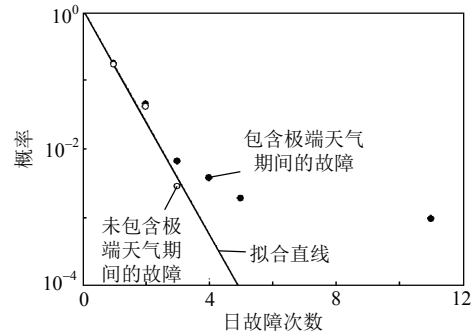


图 3 包含和未包含极端天气期间故障的濮阳配电网故障概率

Fig. 3 Fault probability of Puyang distribution network including and not including faults in extreme weather

可靠性理论分析的一样具有指数分布特点，这一方面证明了在排除具有相互关联性故障后可以利用经典可靠性理论分析电网故障，另一方面又证明了濮阳配电网故障的自组织临界性是由极端天气引发的。

4 结论

本文分析了地处北方的濮阳配电网故障数据，发现尽管濮阳地区与文献[12-13]研究地域在气候条件上存在差异显著，但濮阳配电网故障在极端天气作用下同样具有自组织临界性，服从幂率分布。本文将电网故障在极端天气作用下具有自组织临界性这一推断的有效性推广到了我国北方，可为电网故障统计分布特性研究提供参考。

参考文献

- [1] Su Sheng, Duan Xianzhong, Chan W L. Probability distribution of fault in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1521-1522.
- [2] 程林, 何剑, 孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 8-13.
Cheng Lin, He Jian, Sun Yuan-zhang. Impact of transmission line's real-time reliability model parameter upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 8-13(in Chinese).
- [3] 宋云亭, 张东霞, 吴俊玲, 等. 国内外城市配电网供电可靠性对比分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 13-18.
Song Yunting, Zhang Dongxia, Wu Junling, et al. Comparison and analysis on power supply reliability of urban power distribution network at home and abroad[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 13-18(in Chinese).
- [4] 束洪春, 刘宗兵, 朱文涛. 基于图论的复杂配电网可靠性评估方法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 46-49.
Shu Hongchun, Liu Zongbing, Zhu Wentao. A new method of reliability evaluation for complex distribution network based on graph theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 46-49(in Chinese).

- [5] Carreras B A, Newman D E, Dobson I. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts [J]. IEEE Transactions on Circuit System I, 2004, 51(9): 1733-1740.
- [6] 于群, 郭剑波. 我国电力系统停电事故自组织临界性的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 1-5.
Yu Qun, Guo Jianbo. Study on self-organized criticality of power system blackouts in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 1-5(in Chinese).
- [7] 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 Yijia, Jiang Quanyuan, Ding Lijie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 1-5(in Chinese).
- [8] Dobson I, Carreras BA, Lynch V E, et al. Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and self-organization[J]. Chaos, 2007, 17(2): 026103-13.
- [9] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-31.
Li Shenghu, Ding Ming, Wang Min, et al. Search of power system chained failure mode considering uncertainty of element fault and performance of protective relaying [J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 27-31(in Chinese).
- [10] Mei S, Xue A, Zhang X. On power system blackout modeling and analysis based on self-organized criticality[J]. Science in China: Series E, 2008, 51(2): 209-219.
- [11] 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[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 1-5.
Yi Jun, Zhou Xiaoxin. Cascading failure model of power grids considering frequency response characteristics and hidden failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 1-5(in Chinese).
- [12] 苏盛. 数字化电力系统若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [13] 苏盛, 李银红, 段献忠. 电网故障自组织临界性及其在应对极端天气中的应用[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 387-394.
Su Sheng, Li Yinhong, Duan Xianzhong. Self-organized criticality of power system faults and its application in adaptation to extreme climate[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 387-394(in Chinese).
- [14] Aegerter C M. A sandpile model for the distribution of rainfall [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 319: 1-10.
- [15] Peters O, Hertlein C, Christensen K. A complexity view of rainfall [J]. Physical Review Letter, 2001, 88(1): 18701.
- [16] Bove R, Pelino V, Leonibus L De. Complexity in rainfall phenomena[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2006, 11(6): 678-684.
- [17] Massoud Amin. Energy infrastructure defense systems[J]. Proceeding of the IEEE, 2005, 93(5): 861-875.
- [18] Bunde A, Eichner J F, Kantelhardt J W, et al. Long-term memory: a natural mechanism for the clustering of extreme events and anomalous residual times in climate records [J]. Physical Review Letter, 2005(94): 048701.
- [19] Turcottea D L, Malamud B D. Landslides, forest and earthquakes: examples of self-organized critical behavior [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004(340): 580-589.
- [20] 丁明, 戴仁昶, 洪梅. 影响输电网可靠性的气候条件模拟[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(1): 18-20.
Ding Ming, Dai Renxu, Hong Mei. Simulation to the weather condition affecting the reliability of transmission network [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(1): 18-20(in Chinese).
- [21] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951(116): 770-799.
- [22] Pin E D, Carniel R, Tarraga M. Event recognition by detrended fluctuation analysis: an application to Teide-Pico Viejo volcanic complex, Tenerife, Spain[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 36(5): 1173-1180.
- [23] 陈永进, 任震, 黄雯莹. 考虑天气变化的可靠性评估模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 17-21.
Chen Yongjin, Ren Zhen, Huang Wenying. Model and analysis of power system reliability evaluation considering weather change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 17-21 (in Chinese).
- [24] 刘洋, 周家启. 计及气候因素的大电力系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 60-62.
Liu Yang, Zhou Jiaqi. Incorporating weather effect in bulk power system reliability evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 60-62(in Chinese).
- [25] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise[J]. Physical Review Letter, 1987, 59(4): 381-384.



晁岱峰

收稿日期: 2010-05-25.

作者简介:

晁岱峰(1976), 男, 学士, 工程师, 研究方向为配电网运行管理, E-mail: hnchaodf@139.com;

杨军选(1976), 男, 学士, 工程师, 研究方向为配电网运行分析;

苏盛(1975), 男, 博士后, 研究方向为电力系统风险分析;

石东源(1974), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析和电力系统信息化等。

(编辑 徐梅)