

电网故障自组织临界性及其在应对极端天气中的应用

苏盛, 李银红, 段献忠*

华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074

*联系人, E-mail: xzduan@mail.hust.edu.cn

2008-08-21 收稿, 2008-12-02 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB219701)、国家自然科学基金重大项目(批准号: 50595414)和中国电机工程学会电力青年科技创新基金资助项目

Su S, Li Y H, Duan X Z. Self-organized criticality of power system faults and its application in adaptation to extreme climate.

Chinese Science Bulletin, 2009, 54, [\[doi\]](#)

摘要 从我国中部省市电网运行记录中提取了日故障记录, 对故障时序的分析表明其有明显的长程相关性和幂律分布特性, 具有自组织临界性。相关结论能合理解释被调查电网在 2008 年冰灾中故障大量爆发的现象。由于电网跨越辽阔区域, 其安全稳定运行易受气候条件影响, 对故障原因的分析表明大气系统中降水现象的自组织临界性是被调查电网的故障具有自组织临界性的主导因素。由于极端天气的频率和强度将随全球暖化而加强, 并对电力系统产生显著影响, 分析了全球暖化对电力系统的影响方式, 指出极端天气是全球暖化对电力系统影响的主要途径。结合电网故障自组织临界性, 提出了增强电网对全球暖化适应性, 提高对极端天气事件抵御能力的方法。

关键词
全球暖化
电力系统
极端天气
组织临界性

耗散结构理论认为一个远离平衡态的非线性开放系统通过不断地与外界交换物质和能量, 在系统内部某个参量的变化达到一定阈值时, 通过涨落, 系统可能发生突变, 即非平衡相变, 由原来的混沌无序状态转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态^[1]。自组织临界性是一种解释广延耗散系统行为特征的理论^[2], 它认为由大量相互作用的成分组成的系统会自然地自组织临界态发展; 当系统达到这种状态时, 即使是很小的干扰事件也可能引起系统发生一系列灾变。该特性可以用沙堆模型来描述: 在平面上随机撒下的沙子会形成沙堆, 沙堆的倾角取决于沙子的大小和重力加速度。最初由于沙堆平缓, 新添加的沙粒不会造成沙堆的崩塌。当沙堆坡度随高度而增加时, 沙崩的规模也相应增大, 但这些沙崩仍然是局部性的。当沙堆坡度达到某个临界点时, 外界的微小干扰都可能引起大到整个沙堆所有沙粒的沙崩, 这时的沙堆系统处于“自组织临界态”。沙堆模型可以看成是一个具有局部相互作用和广延自由度的

耗散动力系统。时间序列上的沙崩具有自组织临界性中典型的长程相关性和幂律分布特性, 其幂律分布特性可用下式表述:

$$Pr(X > x) = c \cdot x^{-\alpha}, \quad (1)$$

其中 c 为常数, α 为幂指数。

大气系统作为一种典型的广延耗散结构系统^[3,4], 其降水现象具有明显的自组织临界性^[5-9]。在大气的水汽循环过程中, 蒸发到空气中的水汽就如同撒落在沙堆上的沙粒, 使得空气湿度如同沙堆高度一般上升, 并在一定条件下以降水这一类似于沙崩的形式释放^[4]。以往的研究发现, 自组织临界性广泛地存在于降水(暴雨^[5-8]、雪灾^[6])以及与降水相关的事件(台风^[9,10]、洪水^[10,11]、泥石流、山火^[9,12])中。

电力系统跨越广阔地域, 气候条件往往是影响其安全运行的决定性因素。极端天气下电网故障大量集中出现。据报道, 加拿大 Alberta 电力公司 1986~1990 年间 33% 的停电事故是由恶劣天气引起, 240 kV 线路上 45% 的故障发生在恶劣天气条件下^[13]。在其

他的一些统计数据中,也有约 40% 的电网故障是由恶劣天气引起的^[14]. 国内外科研人员很早就注意到了这种电网故障不均匀分布的特点, IEEE 配电网可靠性规程中将这种主要由极端天气引起的电网故障爆发的现象定义为 Major Event, 并认为在其影响下, 配电网可靠性指标服从对数正态分布^[15]. 一般情况下, 实际系统的可靠性指标的统计分布特性与该假设基本吻合, 但某些极端天气在电网造成的损失则远远偏离对数正态分布^[13]. 针对此现象, 作者就我国配电网故障情况展开了调研, 并初步证明了配网故障时序具有幂律分布^[16]. 由于具有自组织临界性的降水以及降水相关事件是电网故障的主导因素, 进一步探索输电网和配电网故障是否均具有自组织临界性, 并结合这一特性提出电力系统应对极端天气的措施, 具有很强的理论意义和实用价值.

本文首先用华中某省和省城电网的故障数据验证了电网故障的自组织临界性; 然后分析了其自组织临界性的形成机理, 并用所研究电网 2008 年冰灾中的故障数据进一步证明了电网故障的自组织临界性. 由于极端天气的频率和强度将随全球暖化进程加强, 作者还分析了全球暖化对电网的影响, 讨论了利用自组织临界性提高电网对极端天气适应性的方法.

1 电网故障的自组织临界性

为验证电网故障是否具有自组织临界性, 作者从华中某省输电网和省城配网的调度运行日志中提取了每日故障数据进行分析. 对省网选取的是由 2004~2008 年 4 月 220 和 500 kV 系统故障记录, 对配网选取的是 2000 至 2008 年 4 月 110, 35 及 10 kV 系统的故障记录. 由于该两电网在 2008 年春均遭受了

50 年一遇冰灾侵袭, 造成大量杆塔倒塌、线路断线跳闸, 为考察自组织临界性能否解释这一现象, 将故障数据以是否包含 2008 年数据为界制成两段故障序列, 分别绘制如图 1 和 2. 由图可见冰灾对输电配电网的影响有显著区别: 省输电网在此次冰灾前日最高故障次数为 18 次, 而冰灾中连续多日发生大量故障, 日最高故障次数达 177 次, 日故障时序图的结构特征发生了显著变化; 市配网在此次冰灾中的日最高故障次数虽然超过以往的 78 次, 达到了 83 次, 但仍保留了日故障时序的基本结构.

1.1 电网故障的长程相关性

Hurst 指数是分析时间序列是否具有长程自相关的指标^[17]. 由于时间序列中存在大量的随机干扰, 为免于干扰影响, 本文选取能可靠监视非平稳信号中系统内在的动力及趋势的去势涨落分析法计算电网故障序列的 Hurst 指数, 具体计算步骤如下^[18]:

() 首先对序列长度为 N 的日故障数据 x 进行积分, 得到累积时间序列 $y(i) = \sum [x(k) - \bar{x}]$, 其中 $\bar{x}$ 为日故障次数序列的均值.

() 把 $y(i)$ 从头开始划分为长度为 m 的 M 个时段, 其中 $M=T/m$. 对每一时段做一阶多项式最小二乘拟合, 找出在每时段内的趋势 Y_m , 然后按下式计算去势信号的方均根涨落

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [Y(k) - Y(k)]}. \quad (2)$$

() 对取不同数值的时间标度 τ 分别计算 $F(n)$ 的值, 得到的 $F(n)$ 与时间标度 n 间的关系可用下式描述:

$$F(n) \approx c \cdot \tau^H, \quad (3)$$

其中 c 为常数, H 为 Hurst 指数.

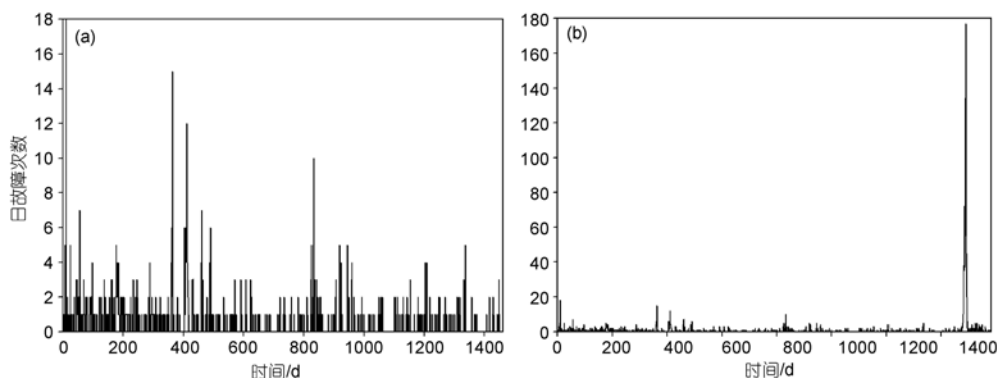


图 1 省网日故障时序图
(a) 2004~2007 年; (b) 2004~2008 年

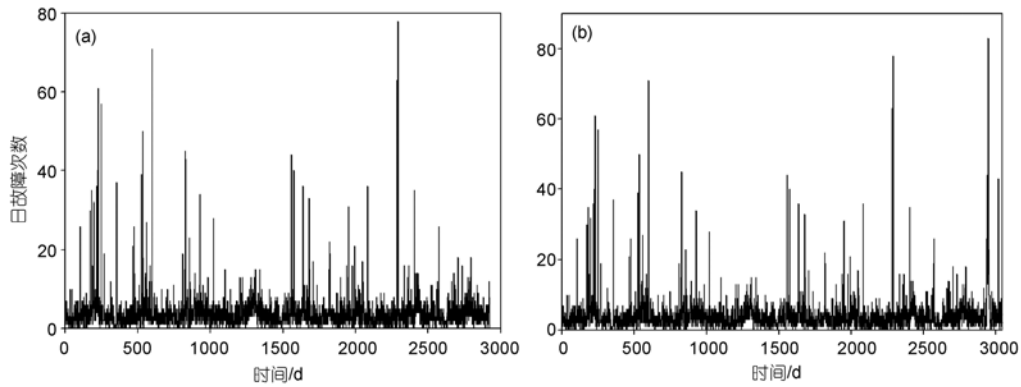


图2 市配网日故障时序图
(a) 2000~2007年; (b) 2000~2008年

在双对数坐标下对 $F(n)$ 和 n 做最小二乘拟合, 可得到 Hurst 指数 H . $H = 0.5$ 表明信号 $x(i)$ 是白噪声; $H > 0.5$ 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; $H = 1$ 时, 信号为周期信号.

本文利用去势涨落分析法计算电网故障时序的长程相关性, 对省市电网计算得到的不同时间标度上的 F 值, 以 $\log n$ 为横坐标、 $\log F(n)$ 为纵坐标绘制如图 3. 由图可见, 在双对数坐标下, 不同时间标度下的 F 呈直线分布, Hurst 指数为拟合直线的斜率, 其值列如表 1. 由图表可见, 冰灾前故障数据与拟合直线有很好的相关性, 包含冰灾的故障数据则波动较大, 但计算得到的 Hurst 参数均大于 0.5, 表明电网故障具有长程相关性.

表1 测试电网的 Hurst 指数

调研时段	省网故障	调研时段	市配网故障
2004~2007年	0.5824	2000~2007年	0.7322
2004~2008年	0.6898	2000~2008年	0.6613

由表 1 可见, 冰灾前后电网故障数据的Hurst指

数在 0.5~1.0 区间小幅度变化, 这表明电网故障的长程自相关性具有一定的鲁棒性. 其中, 由于市配网以往的故障集中发生在夏季暴雨和酷暑时节^[19], 此次冬季冰灾中爆发的故障打破了以往故障年度分布的周期性, 故而配电网故障的Hurst指数有所下降. 对所调研的输电网而言, 其以往的故障主要由冬季和春季的山火、雷暴和覆冰集中引发, 冰灾中爆发的故障显著加强了这一周期性, 故省网故障数据的Hurst指数有明显增加.

1.2 电网故障的幂律分布特性

对幂律分布累积概率函数(1)式取对数, 得

$$\log(Pr(X>x)) = \log c - \alpha \cdot \log x. \quad (4)$$

根据(4)式, 以电网日故障次数累积函数的对数为纵坐标, 以故障次数的对数为横坐标, 可以将累积日故障概率分布绘制在双对数坐标下. 由于 $\log c$ 和 α 为常数, 具有幂律分布的概率分布曲线应呈直线分布, 其在纵轴上的截距为 $\log c$, 斜率的绝对值为幂指数 α .

统计省市电网的累积日故障次数概率后, 绘制日故障次数概率统计如图 4 和图 5, 计算得到的幂指

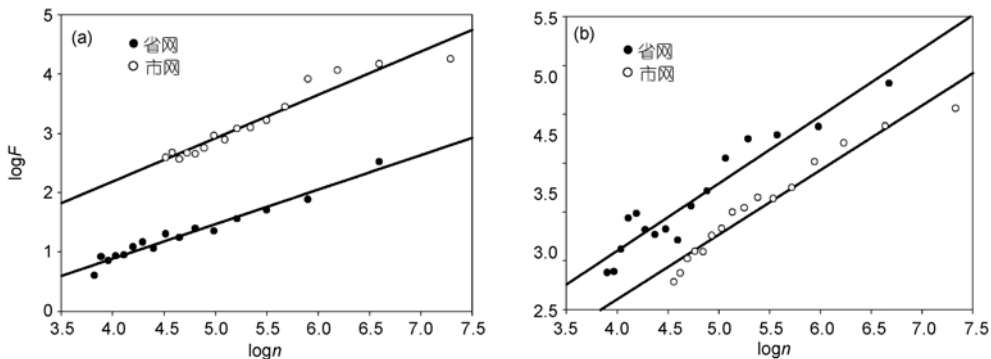


图3 双对数坐标下不同时间标度下 F 数值拟合图
(a) 2004~2007年; (b) 2004~2008年

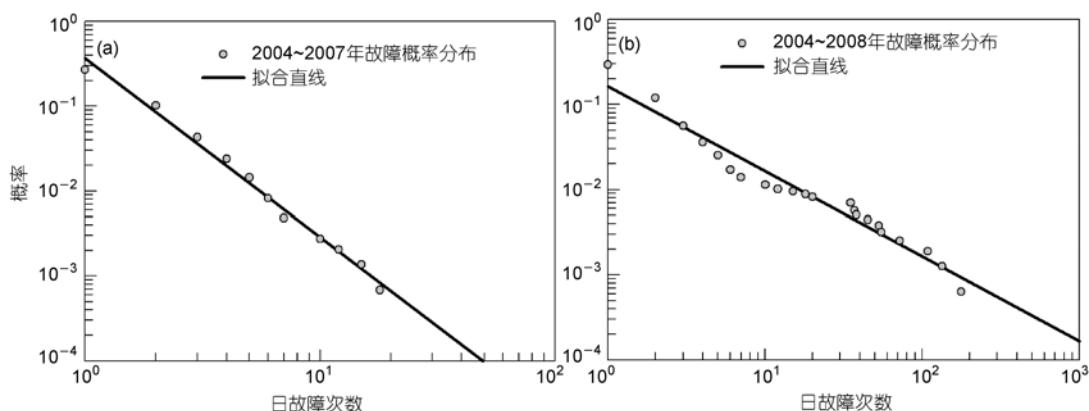


图 4 双对数坐标下省网日故障次数的累积概率分布

(a) 2004~2007 年; (b) 2004~2008 年

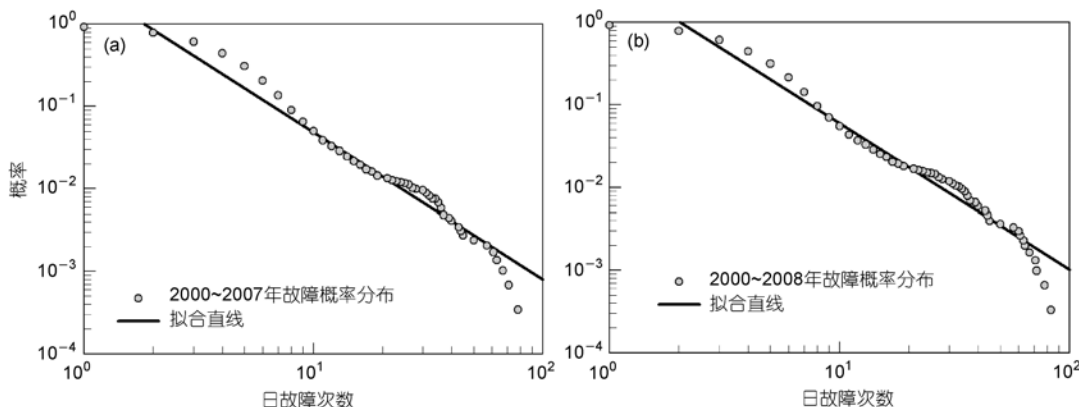


图 5 双对数坐标下市配网日故障次数的累积概率分布

(a) 2000~2007 年; (b) 2000~2008 年

数列如表 2.

表 2 测试电网的幂指数

调研时段	省网	调研时段	市配网
2004~2007 年	2.1064	2000~2007 年	1.7832
2004~2008 年	0.9981	2000~2008 年	1.7669

由图 4 可见, 不包含冰灾的省网数据累积概率在双对数坐标系下呈明确的直线分布, 而包含冰灾的故障数据中, 由于冰灾过程中连续十几天的日故障次数都显著超过以往最多的 18 次, 甚至达到 177 次, 累积概率曲线有了明显的变化, 但仍保持与拟合直线的吻合. 对图 5 而言, 由于冰灾中市配网的日故障次数并不显著多于以往, 故冰灾前后的累积概率分布没有明显变化, 都呈直线分布, 与省网一样具有幂律分布特性.

在电网故障统计概率的幂律分布中, 幂指数表征的是故障不均匀分布的程度, 幂指数越小则故障

越集中于少数时段. 由于冰灾中故障大量爆发, 冰灾后输电网故障概率分布的幂指数均有所下降. 因为冰灾中输电网故障爆发程度远甚于配电网, 相应的, 其幂指数的变化显得更为突出, 这与图 1 和图 2 中冰灾对电网故障时序图的改变也是吻合的.

由于电网故障时序同时具有长程相关性和幂律特性, 可以判定电网故障时序具有自组织临界性.

2 电网故障自组织临界性的机理分析

近年来频繁发生的电网大停电事故引起了国内外对大停电现象的研究热潮, 研究结果表明, 各国电网大停电的直接原因是电网的连锁故障, 而大停电的规模服从幂律分布^[20~23], 那么本文所观测到的电网故障时序的幂律分布特性是不是由电网连锁故障引起的呢? 为阐明该疑问, 需要从引发这两种现象的原因着手分析. 对电网大停电而言, 已有的研究公认初始故障后的潮流转移是其具有幂律分布的关键

因素^[20~23],但这并不是电网故障时序具有自组织临界性并表现出幂律分布的缘由。对本文分析的省网而言,由于其采用保守的运行方式,线路承载负荷不大,初始故障后的潮流转移不会导致潮流越限和保护误动,从近几年数据中故障次数最高日数的故障原因上也看不出电网连锁故障的迹象,因此不能将该输电网故障时序的自组织临界性归结为连锁故障。对配网而言,由于其采用开环运行方式,不存在潮流转移,故障后的负荷转供也是在调度人员的监控下执行,因此同样不能将其自组织临界性归因于电网连锁故障。

为深入分析电网故障的自组织临界性机理,对省网和市配网日故障次数降序排序后,取出各自日故障次数最多的30条记录,并将其具体信息列如表3。

表3 最多故障日故障原因表

序号	省网			市网		
	日期	故障原因	故障次数	日期	故障原因	故障次数
1	08-01-29	覆冰	177	08-01-28	覆冰	83
2	08-01-28	覆冰	134	06-04-11	雷暴	78
3	08-01-27	覆冰	108	08-01-29	覆冰	72
4	08-01-24	覆冰	72	01-08-22	雷暴	71
5	08-01-26	覆冰	55	06-04-12	雷暴	67
6	08-01-30	覆冰	53	08-01-27	覆冰	64
7	08-01-31	覆冰	45	06-04-04	雷暴	63
8	08-01-21	覆冰	38	00-08-16	雷暴	61
9	08-01-25	覆冰	37	08-01-26	覆冰	60
10	08-01-22	覆冰	35	00-09-05	雷暴	57
11	08-01-23	覆冰	35	01-06-18	暴雨	50
12	08-01-20	覆冰	20	02-04-07	雷暴	45
13	08-02-01	覆冰	20	04-04-07	暴雨	44
14	04-01-10	雷暴	18	08-01-21	覆冰	44
15	04-12-28	覆冰	15	02-04-08	雷暴	43
16	05-02-14	覆冰	12	08-04-08	雷暴	43
17	08-01-19	覆冰	10	00-08-12	暴雨	40
18	06-04-12	雷暴	10	04-04-23	雷暴	40
19	04-02-25	山火	7	01-06-09	暴雨	39
20	05-04-04	山火	7	08-01-25	覆冰	39
21	05-04-05	山火	7	00-12-21	雷暴	37
22	08-02-02	覆冰	7	00-08-05	雷暴	36
23	04-12-26	覆冰	6	04-06-26	暴雨	36
24	05-02-07	覆冰	6	05-09-14	雷暴	36
25	05-02-10	覆冰	6	00-07-01	雷暴	35
26	05-02-13	覆冰	6	04-04-06	雷暴	35
27	08-02-02	覆冰	6	06-08-02	雷暴	35
28	05-05-04	雷暴	6	00-08-07	雷暴	34
29	04-01-08	山火	5	02-07-17	雷暴	34
30	04-01-24	山火	5	04-08-06	雷暴	33

由表可见,所调研省市电网故障最多日的故障原因均系恶劣气候(暴雨、冰雪)及气候相关事件(山火、雷暴)。与之类似的,其他电网也普遍具有这种故障大量聚集于恶劣天气下的情况^[13,14]。由于大气降水(暴雨、冰雪)及其相关事件均具有自组织临界性,有理由相信大气系统中降水及其相关事件的自组织临界性是所调研电网故障的自组织临界性的主要原因。

3 全球暖化对电力系统的影响

近年来,温室气体显著增加导致的地表平均温度升高日渐明显。根据文献^[24]报道,由1995~2006年间的11个年份可以排入1850年以来最热的12个年份。针对地表平均温度的上升,美国国家大气研究中心于2007年底发布报告指出,近20年来,热带已经向南北回归线分别推进了280 km,原来处于北回归线以北的湖南省的湘南大部地区目前属于热带区域。对未来气候变化的估计一般都认为暖化将加快步伐。未来100年间,地表平均温度每10年上升0.2~0.4^[24]。随着地表平均气温的上升,更多的水气将被蒸发到大气系统中,并导致与降水相关的极端天气事件的频率和强度加强^[9,25]。

电力系统作为一种最大的人造系统,其所处环境的气象条件是电网安全运行的重要因素。由于全球暖化显著地改变了电力系统的运行环境,它将从多方面、甚至是难以预料的方面对电网产生影响,如随着温度的升高,野生植物生长更加繁茂,继而由山火导致线路放电跳闸的机会也会随之增长^[26]。为全面评估全球暖化对电力系统的影响,美国电力科学研究院就此展开了专题研究,研究报告指出其对电网影响的主要途径是地表平均温度的升高和极端天气的频率和强度的增长。据测算,2050年前,地球温度每升高1℃,电网年负荷需量增加5%,峰值负荷上升5%~14%。由于实际电力系统的规划设计和调度运行本来就要考虑人类活动和经济增长等不确定因素,平均温度的小幅上升并不会对电力系统安全稳定运行造成重大冲击。报告还进一步指出,全球暖化对电力系统的影响将主要来自于极端天气事件频率和强度的加强^[27]。

由于对全球暖化条件下极端天气对电网的影响缺乏完善的理论和全面的认识,目前电网规划设计人员大都认为全球暖化对电力系统的影响主要集中

在发电侧,对电网影响不大.在这种认识的指导下,进行电网建设规划时也都依传统经验按 50 年一遇、30 年一遇标准进行设计.这样的做法没有对极端天气变化的规律进行深入研究,既可能造成电网投资的巨大浪费,也可能无法满足实际系统运行需要,潜藏着巨大的风险.

从目前的观察来看,极端天气的频率和强度对地表平均温度的变化非常敏感,地表平均温度的微小变化都可能对其产生显著的影响^[25,28~31].如根据英国慈善组织乐施会的统计,由于全球暖化的影响,当前全球每年发生的自然灾害次数为 20 世纪 80 年代的四倍^[29];1993 年美国的大洪水在其历史上排第六,近年来同等规模的洪水却频繁发生^[30];湖南省 50 年一遇的冰灾在现实世界中三年两遇;超大规模的飓风和暴雨在国内外都时有耳闻.伴随暖化进程的加剧,极端天气的强度和频率都会发生显著的变化,并已经对城市排水系统^[32]、交通系统^[33]以及电网造成了实质性的伤害.在以往气候条件下百年一遇的气候事件有可能频繁发生^[28],这将对我们规划设计电网时按几十年标准的模式提出挑战,并对电网造成严重的冲击.

4 利用自组织临界性提高对极端天气的适应能力

提高电网对极端天气的适应性主要可以从提高电网规划建设标准和改进调度、技改检修策略两方面着手.由于目前对极端天气对电网的影响没有足够的数据,暂时还不能根据电网使用寿命周期内预期的气候变化场景定量设定电网建设规划的标准.加强对全球暖化以及极端天气变化的规律展开研究,分析其对电网影响的模式,有可能提出经济高效的措施来提高电网对极端天气的适应能力.

幂律分布的一个突出的特征是分布极度不均匀,就电网故障而言,这表现为大量同类型故障集中发生在少数一段时间内,这种现象可以用图 6 来表述.为定量地明确实际系统中这种分布特性,将所调研省市电网日故障次数排序后,从全部统计日中选取一定比例故障最多日的故障进行累积,并将其占全部故障的比例计算如表 4.

由表 4 可见,对省级输电网而言,故障高度聚集于少数时段,且其聚集程度显著高于市配网.反过来再从无故障日数占统计日数比例看,省网为 70.48%,

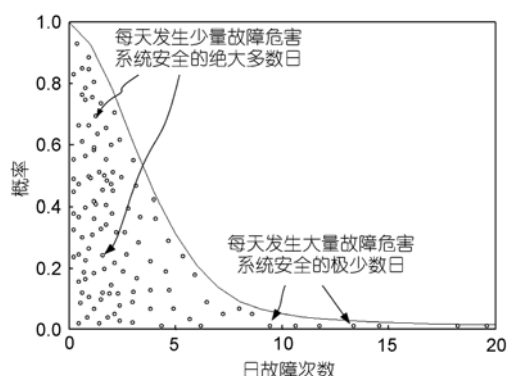


图 6 电网故障幂律分布图释

表 4 恶劣天气日所占故障比例

恶劣天气比例 (%)	3	5	10	15	20
省网 (%)	66.37	73.01	83.56	90.45	95.46
市配网 (%)	20.45	25.68	35.33	43.58	50.66

而配网仅为 7.32%. 我们认为造成这种现象的合理解释是:输电网采用高的规划设计标准,除天气因素外少受其他因素影响,而且一般的恶劣天气也难以引起输电网故障;配电网设计标准较低,且靠近用户侧,一般的恶劣天气以及其他多种因素均可导致故障.如果进一步将输电网在规划设计上即可承受 $N-1$ 的扰动这点考虑进来,该省网故障次数小于 2 的日数比例更将高达 88.05%. 由是,我们可以利用这一特点,结合主因分析法,在电网调度和改造检修中对电网故障高度集中时段做进一步分析,并采取有针对性的措施,提高电网对极端天气的抵御能力.

回顾表 3 可以发现,输电网故障的主导因素是雷暴、山火和覆冰.通过分析故障高发日运行记录发现,由于雷暴和山火持续时间不会很长,现有输电网已建设得相对强大,在实际系统中可通过对相关线路转热备用等方式规避,并以配套的减载措施保证系统稳定.因此,只要选择电网薄弱部位加强输电通道建设,雷暴和山火并不会对电网安全稳定运行造成突出的威胁.相对而言,冰灾持续时间长、覆盖面积大,是电网安全稳定运行的主要威胁.除通过差异化设计,提高特定区段线路建设标准外,对冰灾危害电网的模式进行主因分析,也可以提出经济高效的治理措施.

在本次冰灾中,输电系统突出表现出来的问题有两点.首先是 500 kV 线路缺乏有效的融冰手段.目前,我国电力科研人员已针对此问题在研制适用

于 500 kV 线路的直流融冰电源。其次是架空地线设计薄弱, 广东韶关地区 10 mm 冰区直线塔 37% 地线顶架损坏; 30 mm 冰区直线塔 85% 地线顶架损坏¹⁾。更严重的是, 由于架空地线弧垂异常而接近、接触导线或断线等架空地线故障进一步引发击断导线、拉倒铁塔地线支架甚至损毁铁塔等更大事故, 这种类型的故障在四川电网中占到了总故障的 60% 以上²⁾。提高架空地线及其金具的设计标准, 有望明显提高输电线路的抗冰标准。

配电网设备众多, 要按应对极端天气的要求来提高其建设标准实际上是不可接受的, 但比较容易通过常规技术改造和调度运行措施来提高其应对极端天气的能力。对配电网而言, 主要的故障因素是雷暴、雷雨和覆冰。对前两者, 通过将架空裸导线改造为架空绝缘线和加装避雷器即可较好解决, 这种方法在实际系统中已得到诸多成功应用。冰灾对配网的影响呈两极。一方面, 配网建设标准低, 对轻载的农村配网而言, 其杆塔容易倾覆; 对城市配网而言, 由于线路负荷重, 即便在 2008 年这样的冰灾中, 线路覆冰本身也没有造成断线和倒杆, 市区内的断线和倒杆主要是由树木倾覆所致。此外, 在 2008 年冰灾中, 各地配网运行人员结合实际情况提出了很多实用方法, 从实践上看, 这些措施简单易行, 且成效显著, 加以总结推广即可显著提高配电线路抵御冰灾的能力。如本文调研的市配网中, 运行人员打破短路融冰规程所要求的必须在预设融冰电源站内由融冰间隔经融冰母线提供短路电流的限制, 将待融冰线路直接通过电缆从 10 kV 间隔引融冰电源, 并修改

相关保护定值进行融冰。这种方式打破了必须有融冰间隔和融冰母线的限制, 通过灵活选择融冰电源点, 极大地提高了融冰工作的灵活性和速度, 在抗冰保网中取得了理想的效果。通过对类似的各种实用方法进行总结, 加以规范化后予以推广, 不失为经济有效提高电网对极端天气影响应对能力的捷径。

5 讨论

电网跨越广阔地域, 气候条件对其安全稳定运行具有非常重要的作用。恶劣天气下, 电网故障大量发生。本文验证了电网故障的长程相关性和幂律分布特性, 证明其具有自组织临界性。由于最常导致电网故障的恶劣天气及其相关事件均具有自组织临界性, 本文认为大气系统中降水事件的自组织临界性是所调研电网故障自组织临界性的主要原因。暖化条件下, 随着极端天气频率和强度的增加, 电网故障将更多地集中出现在极端天气条件下。本文提出利用电网故障的自组织临界性, 结合电网故障的主因分析来发现对电网安全运行造成威胁的关键因素。通过分析各地电网的实际经验, 对其中行之有效的各种手段加以推广总结, 有望经济高效地提高电网应对极端天气的能力。

值得一提的是, 电网连锁故障^[20-23]和地震^[12,34]的强度均具有自组织临界性, 同样可能导致电网故障的自组织临界性。本文限于电网故障数据, 没有考虑此类因素对电网故障的概率统计特性的影响。由于这两点因素影响电网的方式显著不同于极端天气现象, 这不会影响本文对极端天气对电网影响的分析及应对方法的效用。

致谢 本文部分工作与美国 Wisconsin-Madison 大学的 Ian Dobson 教授和 Iowa State University 大学的 J.D. McCalley 教授进行了讨论, 在此对他们建设性的意见表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Prigogine I, Nicolis G. Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: John Wiley & Sons, 1977
- 2 Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. Phys Rev Lett, 1988, 59: 381—384^[DOI]

1) 叶鸿声, 薛春林, 何江, 等. 对重要线路及特殊区段线路采取加强措施的研究, 自然灾害对电力设施的影响与应对研讨会, 北京, 2008.5.30-31

2) 四川电力送变电建设公司. 提高架空地线冰载设防标准是送电线路增强抗冰灾能力的捷径, 自然灾害对电力设施的影响与应对研讨会, 北京, 2008.5.30-31

- 3 柳崇健. 大气耗散结构理论. 北京: 气象出版社, 1988
- 4 Rind D. Complexity and climate. *Science*, 1999, 284: 105—107[DOI]
- 5 Peters O, Christensen K. Rain: Relaxations in the sky. *Phys Rev E*, 2002, 66: 036120[DOI]
- 6 Aegerter C M. A sandpile model for the distribution of rainfall. *Physica A*, 2003, 319(1): 1—10
- 7 Peters O, Hertlein C, Christensen K. A complexity view of rainfall. *Phys Rev Lett*, 2001, 88: 018701
- 8 Bove R, Pelino V, De Leonibus L. Complexity in rainfall phenomena. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2006, 11(6): 678—684[DOI]
- 9 Saunders M A, Lea A S. Seasonal prediction of hurricane activity reaching the coast of the United States. *Nature*, 2005, 434: 1005—1008[DOI]
- 10 Amin M. Energy Infrastructure defense Systems. *Proc IEEE*, 2005, 93(5): 861—875[DOI]
- 11 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. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 048701[DOI]
- 12 Turcotte D L, Malamud B D. Landslides, forest, and earthquakes: Examples of self-organized critical behavior. *Physica A*, 2004, 340(4): 580—589[DOI]
- 13 Acharya J R. Weather effect considerations in reliability evaluation of electrical transmission and distribution systems. Master Thesis. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2005
- 14 Billinton R, Acharya J R. Weather-based distribution system reliability evaluation. *IEE Proc Gene Trans Distr*, 2006, 153(5): 499—506[DOI]
- 15 IEEE Std 1366 2003. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, 2003
- 16 Su S, Duan X, Chan W L. Probability distribution of fault in distribution systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2008, 23(3): 1521—1522[DOI]
- 17 Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans Amer Soc Civil Eng*, 1951, 116: 770—808
- 18 Pin E D, Carniel R, Tárraga M. Event recognition by detrended fluctuation analysis: An application to Teide – Pico Viejo volcanic complex, tenerife, spain. *Chaos Soliton Fract*, 2008, 36(5): 1173—1180[DOI]
- 19 张勇, 陈凤. 长沙地区配电运行事故统计分析. *中国电力*, 2007, 40(5): 28—31
- 20 Carreras B A, Newman D E, Dobson I. et al. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2004, 51(9): 1733—1740[DOI]
- 21 Bakke J Ø H, Hansen A, Kertész J. Failures and avalanches in complex networks. *Europhysics Lett*, 2006, 76(4): 717—723[DOI]
- 22 Mei S, Xue A, Zhang X. On power system blackout modeling and analysis based on self-organized criticality. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51(2): 209—219[DOI]
- 23 Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the North American power grid. *Phys Rev E*, 2004, 69(2): 025103[DOI]
- 24 Bernstein L, Bosch P, Canziani O, et al. Climate change 2007: Synthesis Report. Technical Report. International Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007
- 25 Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 2002, 415: 514—517[DOI]
- 26 Overbye T, Dobson I, Jewell W, et al. The Electric Power Industry and Climate Change: Power Systems Research Possibilities. Technical Report, Power systems engineering research center of the United States of America. 2007
- 27 Climate change impacts and the electric sector. Technical Report, Electric Power Research Institute of the United States of America. 2006
- 28 Diffenbaugh N S, Pal J S, Trapp R J, et al. Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2005, 102(44): 15774—15778[DOI]
- 29 Oxfam G B. Climate Alarm, Disasters increase as climate change bites. Technical Report, OXFAM. 2007
- 30 Knox J C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Sci Rev*, 2000, 19(1): 439—457[DOI]
- 31 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征. *科学通报*, 2008, 53(7): 829—832
- 32 Arnbjerg-Nielsen K. Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Sci Technol*, 2006, 54(6-7): 1—8
- 33 Suarez P, Anderson W A, Mahal V, et al. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A system wide approach for the Boston Metro Area. *Transport Res Part D*, 2005, 10(3): 231—244[DOI]
- 34 Turcotte D L. Applications of statistical mechanics to natural hazards and landforms. *Physica A*, 1999, 274: 294—299[DOI]