

无标度网络特性电网的连锁故障脆弱性评价

本文基于复杂网络理论,考察了无标度电网中节点的异质特性,提出以负荷损失度作为连锁故障评价指标以及制定多种故障模式,重点分析了基于无标度特性电网中的连锁故障传播机理,考察了电网无标度网络特性对连锁故障传播机制的影响。对实际电网的拓扑特性研究以及故障仿真结果表明:具有无标度特性电网其自身的结构脆弱性是造成大规模连锁故障迅速蔓延的最根本原因。在进行电网规划时,改善电网资源配置,尽可能避免节点负载分布的极不均匀性将有助于降低大规模连锁故障在电网当中发生的概率,对保证电网安全可靠运行具有重要意义。

杨楠¹ 孙健¹ 王海云¹ 董楠² 李立志² 钱梓锋²/1. 国网北京电科院 2. 国网北京市电力公司电力调度控制中心

0 引言

随着经济社会的不断发展,电网的大规模互联,使得大型电网运行方式愈加复杂,从而加大了电网事故的概率。近年来,世界各国对电网连锁故障引发的大面积停电开展了广泛关注。如何快速识别连锁故障对降低互联电网发生连锁故障及大停电事故的风险,对提高电力系统安全运行水平具有重要意义。

目前国内外学术界主要从两个角度对电网连锁故障进行研究。一是以电力系统稳态以及暂态分析为核心,用特定概率描述系统行为来研究电力系统连锁故障整体行为特点。文献[1]基于对电力系统连锁故障风险评估计算,建立了新的线路潮流越限时隐性故障模型,对故障线路进行筛选和识别。文献[2-3]建立了基于频率特性和隐式故障的连锁故障模型,寻找临界负载率和关键线路,并得到连锁故障风险指标。二是以

电力网络结构为切入点,基于复杂网络理论研究电网结构脆弱性及连锁故障传播机理。文献[4-5]对具有小世界网络和无标度网络的人工电力网分别进行了仿真,研究节点失去机制,并结合无标度网络建立新的连锁故障模型,在故障初期快速识别连锁故障。但上述研究对于高风险的连锁故障及大停电的原因、发展过程和机理研究还十分有限。

本文着重探讨了基于无标度特性电网的异质特性,分析了连锁故障在无标度电网中的传播机理,并通过对实际电网的仿真计算分析了无标度电网对不同故障的承受能力,提出了此类无标度电网对连锁故障承受能力的改善方法。

1 无标度网络特性

1.1 无标度网络模型

无标度网络通过增加新的节点而实现连续增长,同时这些新的节点总是倾向于选择连接已经具有大量连接的节点。无标度网络模型的具体描述如下^[6]:

(1) 增长性:考虑开始有小数目 m_0 个节点,在每一个时间步增加一个新的节点,同时这个新节点连接到网络中 m ($m \leq m_0$)个已经存在的节点上。

(2) 倾向性选择:一个新的节点选择某个节点 i 的概率 p_i 正比于这个节点 i 的度。所谓“度”是指节点 i 上所连接的边的数目。一个节点的度越大,就意味着这个节点在某种意义上越重要^[7]。

1.1.1 无标度网络节点度分布的幂律特性

相对于随机网络,在无标度网络中各节点的度值呈现出明显的异质性。对



杨楠/工程师

关键词/Keywords

连锁故障·
无标度·
电力系统·
网络异质性·
集散节点·
负荷损失度·

于给定的复杂网络,假定其中不存在孤立节点,不存在自环,则节点度分布 $P(k)$ 定义为^[8]

$$P(k) = \frac{\text{度值等于}k\text{的节点数}}{\text{节点总数}} \quad (k\text{为任意正整数}) \quad (1)$$

设节点总数为 N ,边总数为 W ,则对于每个节点的度最少为1,最多为 $N-1$,可知度分布存在下列关系

$$\sum_{k=1}^{N-1} p(k) = 1 \quad (\text{完备性}) \quad (2)$$

而对于无标度网络而言, $P(k)$ 是一个幂函数,可以用幂律分布(Power Law)描述

$$P(k) \propto ak^{-r} \quad (3)$$

式中, r 为度分布指数, r 和 a 均为大于零的常数。根据完备性,可从幂律关系式(3)中推导出系数 $a = 1 / \sum_{k=1}^{N-1} k^{-r}$ 。

对于式(3)两边取对数,可知 $\ln p(k)$ 与 $\ln k$ 满足线性关系

$$\ln p(k) = \ln a - r \ln k \quad (4)$$

幂律分布在双对数坐标下表现为一条斜率为负幂指数的直线,如图1所示。

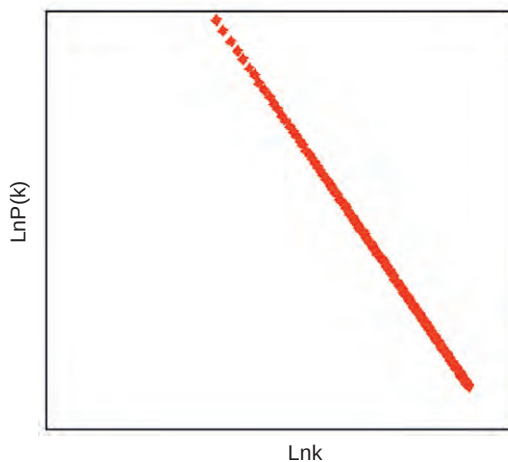


图1 无标度网络度的幂律的双对数分布

图1所示这一线性关系是判断给定的实例中随机网络度分布是否满足幂律分布的依据^[9]。

1.1.2 无标度网络的基尼系数

设一个复杂网络具有 N 个节点,将其按照度值由小到大进行排序,记为 $a_1, a_2, \dots, a_N$,而将相应的度值记为 $d_1, d_2, \dots, d_N$,则显然有 $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_N$ 。对于 $1 \leq i \leq N$,记 $W_i = d_i / \sum_{j=1}^N d_j$ 。可以得到复杂网络的基尼系数^[10]

$$G = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(2 \sum_{k=1}^i W_k - W_i \right) \quad (5)$$

利用关系式 $W_i = d_i / \sum_{j=1}^N d_j$ 并经过简单推导可以将式(5)改写成如下形式

$$G = \frac{\sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \left(\frac{N+1}{2} - k \right) (d_{N+1-k} - d_k)}{\frac{N}{2} \sum_{k=1}^N d_k} \quad (6)$$

其中, N 为复杂网络中节点的个数, $d_1, d_2, \dots, d_N$ 为复杂网络中经过排序后的节点度值, $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ 表示不超过 $\frac{N}{2}$ 的最大整数。

由表达式(6)可以发现,基尼系数刻画了复杂网络的异质性。基尼系数低于0.2表示节点度值分布绝对平均,0.2~0.3表示比较平均,0.3~0.4表示相对合理,0.4~0.5表示节点度值差距较大,0.5以上表示差距悬殊。对于给定复杂网络,当其度值大于0.4时,则此网络符合无标度网络节点异质性的特性要求。

1.2 实际电网的无标度网络特性验证

本文将通过对某省级电力网络进行分析,研究其是否具备无标度网络特性。基于复杂网络特性以及兼顾电力系统自身特点,在建立实际电网的拓扑模型时,采取以下简化标准:

(1) 仅考虑220 kV及以上主要输电网络,110 kV及以下部分视为等效负荷。

(2) 图中节点表示发电厂以及变电站,边线代表220 kV及以上线路。

(3) 虽然潮流在电力网络中是双向流动,但线路本身物理参数不受影响,因此,可以认为网络中的边均为无向边。

在此简化基础之上,电网当中各电气元件之间的连接关系被抽象成一张抽象网络拓扑图。表1中列出了对某省级电网节点度分布数据的统计结果。

从表1中可以看出,该省电力网络占较大比例节点度值都较低,较低比例的节点具有很高的连接能力。因此,该电力系统是一个典型的非均质网络。

结合该电网节点度值统计结果,计算该电网基尼系数 $G=0.4283$,大于网络异质性指标的临界值0.4。因此,可以看出该电网的节点度分布差异满足无标度网络节点的异质性要求。

又根据表1可绘制出的该电网中节点度分布的

表1 某省级电网节点度分布数据统计结果

节点度值	具有相应度值的节点数	节点度分布
20	1	0.003586
19	1	0.003586
17	2	0.007001
16	1	0.004213
15	4	0.011020
14	1	0.004087
13	3	0.014575
12	4	0.011081
11	6	0.016371
10	2	0.004087
9	6	0.018392
8	9	0.028952
7	16	0.060441
6	26	0.097206
5	18	0.068337
4	47	0.170959
3	85	0.304703
2	86	0.298189
1	18	0.060551

双对数曲线如图2所示。

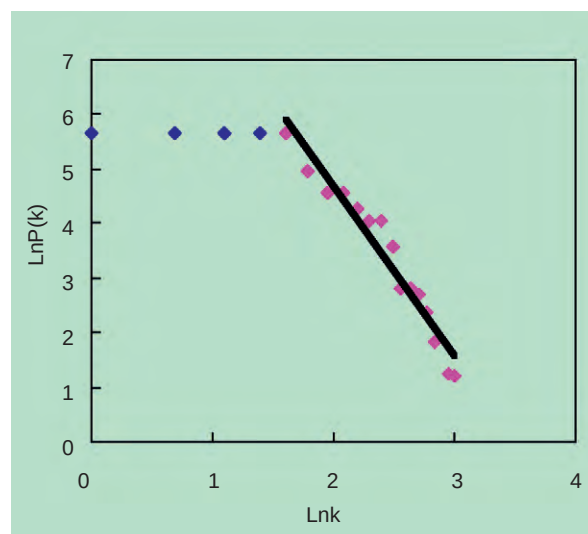


图2 该省级电网节点度分布双对数曲线及其线性拟合

从图2可以看出, 图中处于后半部分的各个数据点恰好落在双对数平面的一条直线上, 且度分布指数 $\gamma=3.4969$, 系数 $\alpha=0.8874$ 。可以看出, 该省级电力网络的节点度值分布在双对数平面表现为一条斜率为负幂指数的直线, 即此区域电力网络的节点度分布遵从幂律分布, 因此可以看出该省级电网具有无标度网络特性。

2 基于无标度特性电网的连锁故障传播机理

无标度电网的异质性决定即使随机除去网络中的一般节点, 网络仍然可以保持基本的连通性, 传输性能不会因此遭到毁坏, 而当网络中度值较高的集散节点失效时, 就可能破坏网络的传输能力。正因为无标度网络的这种特性, 导致虽然只占整个网络节点中极少部分却具有大量连接的关键集散节点, 在保障网络功能的实现上具有举足轻重的作用^[15]。一旦这些节点出现故障或者遭到攻击而失效将会导致网络中其它节点相继出现过载现象。这种过载在全网传播所引起的连锁故障将会导致网络大面积雪崩^[16]。美国Bak、Tang等学者通过建立“沙堆模型”从理论上研究网络的雪崩行为^[17], 发现在无标度网络中雪崩尺度仍然服从幂律分布, 且其幂指数 τ 与网络的度分布指数 γ 满足下列关系

$$\tau = \begin{cases} \gamma/(\gamma-1), & 2 < \gamma < 3. \\ 1.5, & \gamma > 3. \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, γ 越小, τ 越大, 当 $\gamma=2$ 时, τ 达到最大值2, 而当 $\gamma \geq 3$ 时, τ 达到其最小值1.5。 τ 越小说明网络发生雪崩的概率越大, 而根据本文以及Chassin等学者的统计结果, 该省级电网度分布指数 $\gamma=3.4969$, 北美Western System以及Eastern Interconnect的度分布指数 γ 分别为3.09和3.04, 这说明在电力传输网中存在较大的雪崩概率。

综上所述, 连锁故障对于具有无标度特性电网的危害远大于非无标度电网的危害。无标度电网网络拓扑结构的异质性是造成其脆弱性的根本原因所在: 在实际电网中, 这类度值很高或较高的集散节点恰恰为各自供电区域的枢纽变电站或重

要发电厂,具有联络面宽,负载重的特点。若由于自身设备故障或其它原因导致退出运行,电网中的潮流将会转移,导致其它诸多线路,尤其是低电压等级的输电线路出现过载现象^[19]。

3 实际电网仿真分析

3.1 基于交流最优潮流的连锁故障模型

本文基于电力系统自组织临界理论(SOC),采用基于交流最优潮流(OPF)的连锁故障模型来描述无标度电力网络连锁故障的传播过程^[20]。该模型能够全面反映电网连锁故障的快动态过程和模拟电网发电机出力变化、负荷水平变化以及电网传输能力变化的慢动态过程。

快动态过程模拟先通过最优潮流和切负荷确定电力系统的运行方式;然后若某一重载线路故障,系统重新按照最优潮流确定运行方式,直到不再有重载线路出现故障,则连锁故障结束。

慢动态过程主要包括发电机出力变化、线路传输能力变化以及负荷水平变化三个方面。

(1) 对于发电机最大出力变化

$$P_{gi,max}^{k+1} = \gamma P_{gi,max}^k \quad (8)$$

$$Q_{gi,max}^{k+1} = \gamma Q_{gi,max}^k \quad (9)$$

式中, $P_{gi,max}^k$ 和 $Q_{gi,max}^k$ 分别为某时段k内节点i的发电机有功、无功出力上限。

(2) 对于线路传输容量的变化

$$F_{j,max}^{k+1} = \mu F_{j,max}^k \quad (10)$$

式中, $F_{j,max}^k$ 为线路j在某时段k内的传输容量, μ 为线路传输容量因子,若线路无需改造,则 $\mu=1$ 。

3.2 故障评价指标

电力系统连锁故障是导致大停电事故的重要原因,本文采用负荷损失度 η 来度量连锁故障的传播程度以及严重程度

$$\eta = \frac{D_{Loss}}{D_{all}} \quad (11)$$

式中, D_{Loss} 表示系统故障后产生负荷损失量; D_{all} 表示未发生故障之前系统可供电负荷总量。负荷损失度指标能客观表征连锁故障对电网造成损失的严重程度,定量反映了电力系统中故障的传播程度以及系统自身的脆弱程度。

3.3 故障模式

故障模式设置主要基于前文所研究省级电网

节点度数统计结果,研究分别失去高度数节点和低度数节点后对具有无标度特性电网传输能力的影响。具体实施方案为:

(1) 方案1: 将各节点按度值大小降序排列,采样节点数目为14个,占电网节点总数的4.9%。总是将度值排在最前面的节点做为初始故障发生地点,并依次增加初始故障节点个数,以模拟电网中高度值节点因故障退出运行而引发的连锁故障;

(2) 方案2: 将各节点按度值大小升序排列,由于无标度电网的特性,低度值节点占电网中节点的绝大多数,故每一个节点水平级仅随机抽取两个节点设置为故障节点,同样一共抽取14个采样节点。总是将排在最前面的节点做为初始故障发生地点,并以此增加初始故障节点个数,以模拟电网中低度值节点因故障退出运行而引发的连锁故障。

3.4 实际电网算例分析

故障模式所设置的方案1主要用于考察电网遭受恶意攻击,导致依次失去高度值节点后电网传输能力的脆弱性,方案2主要用于考察电网遭受随机扰动,导致失去低度值节点后电网传输能力的鲁棒性。本文还将对两种方案下的电网负荷损失度进行横向比较,以更直接的反应不同类型节点对电网结构完整性以及网络传输能力的重要性。

设定 $D_{Loss,1}$ 和 $D_{Loss,2}$ 分别为故障模式中方案1以及方案2下的电网负荷损失度, N_{int} 为初始故障节点数, N_{all} 为电网节点总数目,令 $\beta_1 = N_{int} / N_{all}$, $\beta_2 = D_{Loss,1} / D_{Loss,2}$ 。针对该省级电网按方案1和方案2进行连锁故障模拟时,两种方案下的负荷损失度水平对比曲线如图3所示。

从图3所示仿真结果我们可以清楚地看到,在方案1下,仅失去占全网节点数量4.9%的高度值节点时,负荷损失度便高达87.1%,此时系统传输能力大大下降,电网结构完整性遭到严重破坏,具有无标度特性的电网络在面对基于集散节点的故障触发方式时呈现出固有的脆弱性。在方案2下,相继失去同样比重的低度值节点导致的负荷损失度仅为14.2%,系统传输能力未受严重破坏,具有

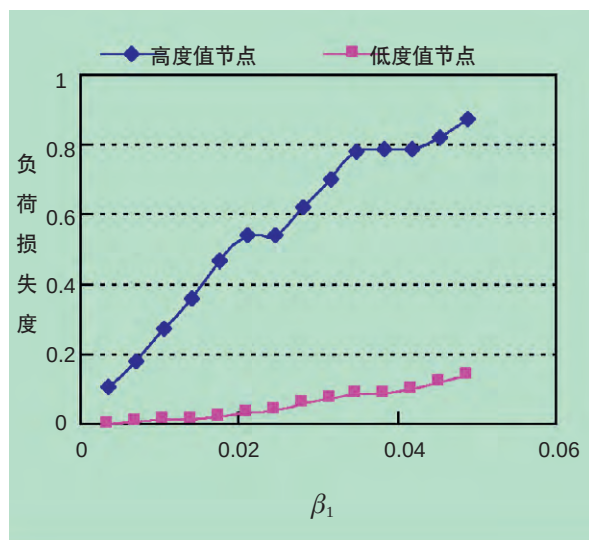


图3 两种故障方案下负荷损失度水平对比曲线

无标度特性的电网络在面对基于一般节点的故障触发方式时又具有惊人的鲁棒性。两种故障方案下的负荷损失度比值变化如图4所示。

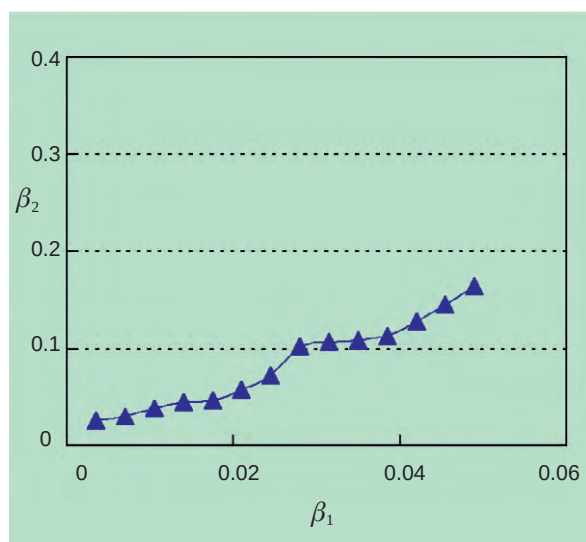


图4 两种故障方案下负荷损失度比值变化曲线

对比图4中两种故障方案下的负荷损失度比值可以更清楚地看到，电网失去低度值节点所导致的负荷损失度最高仅约为失去同样数量高度值节点所导致负荷损失量的16%左右。表明，在具有无标度特性的电网当中，占有很少数量的高度值节点因故障退出运行时，电网将变得非常脆弱，

潮流路径发生巨大变化，电网输电能力下降程度远远高于失去低度值节点时的情况。

4 结束语

由于无标度特性电网网络异质特性的存在，电网中存在度值较高的集散节点，使得其承担的节点输电负荷远高于其它非集散节点。通过对无标度电网的连锁故障仿真结果表明，高度值集散节点是此类电网的最薄弱环节，这类节点因故障退出运行将导致电网输电通道发生巨大改变，潮流转移严重导致低电压等级的输电设备相继过载，这是造成无标度电网故障蔓延的根本内在原因。因此，在进行电网规划时，应避免电网呈现出无标度特性，改善电网资源配置，尽量降低电网节点负载分布的极不均匀性将有助于降低大面积雪崩现象在电网当中发生的概率，保证电网运行的安全可靠。

参考文献

- [1] 杨明玉, 田浩, 姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 1-5.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 丁理杰, 曹一家, 刘美君. 复杂电力网络的连锁故障动态模型与分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(4): 641-646.
- [5] Bao Z J, Cao Y J, Ding L J, et al. Dynamics of load entropy during cascading failure propagation in scale-free networks[J]. Physics Letters A, 2008, 372(36): 5778-5782.
- [6] Wang Xiaofan, Chen Guanrong. Complex Networks: Small-world, Scale-free and Beyond[J]. IEEE

- Circuits and System Magazine, 2003, (03) : 6-20.
- [7] 梁才, 刘文颖, 温志伟, 平德明. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20):6-11.
- [8] 王林, 戴冠中. 复杂网络的scale-free性、scale-free现象及其控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009年9月.
- [9] Mottor A E, Lai Yingcheng. Cascade based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102/1-065102/4.
- [10] 王林, 戴冠中, 胡海波. 无标度网络的一个新的拓扑参数[J]. 系统工程理论与实践, 2006, (06) : 50-51.
- [11] 丁道齐. 复杂大电网安全性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010年2月.
- [12] 杜金柱, 蒋晓原. 基于无尺度网络雪崩效应控制的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (5) :104-106.
- [13] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality[J]. Phys. Rev. A, 1998, (38): 364-374.
- [14] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 130-133, 150.
- [15] Mei S M, Ni Y X, Wang G. A study of self-organized criticality of power system under cascading failures based on AC-OPF with volt-age stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, (23): 1719-1726.

(收稿日期: 2015-5-21) EA

作者简介

杨楠(1985-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统经济运行、分析与控制;

(上接第683页)

而通过操作权的切换, 某一用户可将自己桌面的操作权交给其他进程用户, 达到了进程控制桌面的效果。桌面共享功能提供给用户灵活的进程控制、共享应用的使用感受。

2 结束语

综上所述, 移动UC 通过“多终端的适配支持”、“UC终端的安全接入”、“UC终端的音视频质量保障”和“UC终端支持丰富的应用, 一致体验”四个关键技术, 全方位达到企业BYOD的需求, 使移动UC使用BYOD办公成为了可能。

参考文献

- [1] 戚晨. 统一通信简述[J]. 中兴通讯技术, 2008, 07.
- [2] 李健, 韦伟. 统一通信及其标准化[J]. 电信网技术, 2009, 07.
- [3] 王莹. BYOD办公已成为另一种趋势[N]. 网络世界, 2013-03-18 (040) .

- [4] 曹衡康. BYOD的实施务必简单而安全[N]. 人民邮电, 2013-05-16 (005) .
- [5] 张庚, 刘革, 汪洋, 苏澜, 等. 统一通信技术在电网中的应用[J]. 电信科学, 2012, 28(12).
- [6] 孙强强. BYOD在电力企业中的研究与应用[J]. 现代计算机, 2013, 11.
- [7] 洪林. BYOD渐渐风靡 38%企业3年后不再向员工提供工作设备[N]. 人民邮电, 2013-05-07 (006).
- [8] 孙可. 员工BYOD迈进个人云时代[N]. 网络世界, 2012-04-23 (036)

(收稿日期: 2015-5-25) EA

作者简介

宋曦(1981-) 女, 国网四川电力公司工程师。