

基于复杂网络属性的电网灾难性事件 综合风险评估

张 灏

(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘要:宏观上网络的结构属性与微观上设备的电气特性塑造电网灾难性事件的风险。电网灾难性事件作为具有动态时序的事件,需同时评估发生的直接风险和隐含的潜在风险。潜在风险会随着故障的发展,在电网结构中的薄弱环节传播潜藏。当初始故障在电网中开始传播时,直接风险和潜在风险也根据电网固有属性的节点度和节点聚类影响着灾难性事件风险的扩散机制。文中基于不确定风险分析理论和联系数理论,综合考虑故障传播的直接风险和潜在风险,通过节点度和节点聚类系数定量评估故障引发的直接风险与潜在风险之间不确定的关联系数;最终得出故障的综合风险,改进了传统的电网灾难性事件动态风险评估方法。同时兼顾电网具有小世界效应和无标度拓扑的属性,建立兼具两者属性的阿波罗尼电网,通过对人工阿波罗尼电网进行灾难性事件风险评估,验证了所提方法的有效性和可行性,并用西部某地区实际电网验证其合理性。结果证明,所得结果符合工程实际,更完整地刻画了电网灾难性事件的综合风险。

关键词:灾难性事件;直接风险;潜在风险;联系度;综合风险;阿波罗尼网;节点度;聚类系数

中图分类号:TM 711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)02-0074-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220214

Comprehensive Risk Assessment of Catastrophic Accident in Power System Based on Complex Network

ZHANG Xian

(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Structural properties of the grid on a macro level and electrical characteristics of the components on a micro level together determine the risk of catastrophic failures. As a dynamic development process, the catastrophic failure not only needs to consider its direct risk but also the potential risks. Unlike the direct exposure of direct risk, potential risks are spread and hidden along with the inherent properties of network connection. When the risk spreads, the inherent properties of the grid affects the diffusion mechanism of catastrophic failure. Based on uncertainty risk analysis theory and contact number theory, and considering direct risk and potential risk comprehensively, the uncertain correlation coefficient between direct risk and potential risk is quantitatively characterized by degree and clustering coefficient of node. Taking the grid contains small-world effect and scale-free topology into account, the Apollonius power grid is established to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method, and to verify its rationality by a real power grid in western region. The results prove that the proposed method can meet the practical needs of engineering and describe the comprehensive risk of catastrophic accident in power system more completely.

Key words: catastrophic accident; direct risk; potential risk; degree of connection; comprehensive risk; Apollonius power grid; node degree; clustering coefficient

0 引言

结构决定功能,功能进化结构。电网故障传播的动力学行为兼受网架结构和潮流参数的影响。因此,在评估电网安全时,国内外学者已注意到结构量与电气量之间复杂的耦合关系对电网安全具有深层次的影响。

文献[1-3]从运行状态量的角度研究了故障传播机制。文献[4-6]研究发现实际电网与小世界网络具有高度相似性,即较小的拓扑平均距离和较大的聚类系数,并发现美国西部、中国北方、华东电网均属于小世界网络。至此,科研人员开始关注电网架构中的复杂网络结构属性对灾难性事件的影响。不久,A Barabási、R Albert 等学者发现很多真实的大型网络中节点的度分布都服从无标度幂律分布^[7],发现并证明了北美电力系统属于无标度网络^[8-9],并开始利用无标度网络模型研究北美电网。综上所述,虽然研究关注的电网范围和地区不同,但电网的复杂网络结构属性往往兼具小世界网络和无标度网络属性。由于不同网络属性的网架结构在应对灾难性事件时又表现出不同的动力学行为,而现有研究暂未在兼具两种网络结构属性的电网领域开展^[10-11],故构建既具有无标度效应又具有小世界效应的复杂网络来研究实际电网的灾难性事件^[12,18]传播发展机制是十分必要的。

从电网电气量角度出发,现有研究构建了各类电气量评估指标,但归根结底设备故障造成的电气量影响还是负荷损失。故障不仅会对电网造成直接的负荷损失(即直接风险),而且由于电网元件对故障扰动的耐受能力具有区间性使得部分风险并未立即释放出来,即还会造成潜在的负荷损失(潜在风险)在电网架构上不断累积。因而需要同时刻画上述两种风险,才能准确评估电网灾难性事件的风险。文献[12]基于不确定风险理论^[13-14]和联系数理论^[15]建立了电网连锁故障的综合风险指标,但在反映直接风险和潜在风险关联关系的联系数确定上,仅考虑了极端情况,并未得出具有普适性的数学定量刻画方法。

下面基于电网中结构状态和运行状态之间高度耦合这一实际,考虑到电网常常兼具小世界效应和无标度效应,采用更符合实际电网网络属性的阿波

罗尼网对电网进行分析评估;通过应用刻画节点的邻居节点之间联系紧密程度的聚类系数,定量刻画了故障传播过程中直接风险和潜在风险之间关联关系的联系度。最后,通过对人工阿波罗尼电网和西部某地区电网仿真分析,证明了所提方法的正确性。

1 复杂网络属性

复杂网络属性中著名的小世界效应指网络中较小的平均距离和较大的聚类系数,无标度效应则指网络中节点度分布呈幂律分布。而在实际的电网建设中,节点母线往往是兼具较小的平均距离和较大聚类系数以及幂律分布。如能构造兼具小世界效应和无标度效应的复杂网络来分析评估电网,更能反映真实电网的属性特征。

1.1 阿波罗尼网络

2005 年国际著名期刊《Physical Review Letters》发表了一篇根据著名阿波罗尼填充(Apollonian Packing)问题构造的新型复杂网络,故将其称为阿波罗尼网络^[16]。文献[16-17]研究发现该网络具有幂律分布、较高的聚类系数以及较小的平均距离,即该网络是兼具小世界效应和无标度效应的复杂网络。

阿波罗尼网络由古希腊数学家阿波罗尼提出的阿波罗尼填充问题构造而来,如图1所示。初始状态是3个相切的圆,其空隙构成一个曲线三角形,第1步填充将一个正好与曲线三角形的三条边相切的圆填入空隙。由于此圆的填入,则产生3个更小的空隙;在第2步迭代中,将3个合适的圆填入新产生的空隙中,依旧使得新放入的圆与所填充的曲线三角形相切。此过程不断地重复下去,当迭代步数趋向于无穷时便得到了阿波罗尼填充。由阿波罗尼填充问题得到的网络规则是:将每个圆当作网络中的一个节点,若圆与圆之间存在相切关系,则在网络

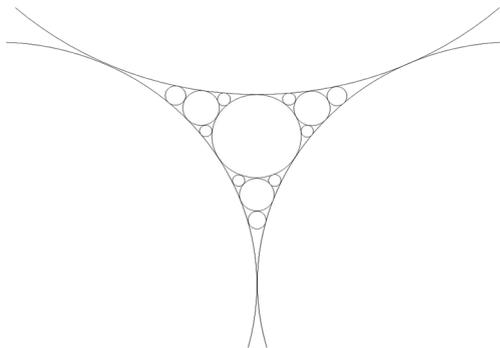


图1 阿波罗尼填充的前3步迭代构造

中对应的节点之间存在联接关系,这便得到阿波罗尼网络,图 2 显示了阿波罗尼网络构造的过程。

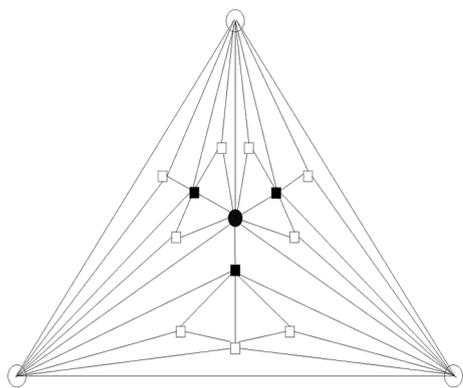


图 2 阿波罗尼网络的前 3 步迭代

1.2 阿波罗尼网络的复杂网络属性

1.2.1 度分布

度分布是复杂网络中三大重要统计特征之一,它表示节点度的概率分布函数 $P(k)$,即指随机选取网络中某一节点有 k 条边的概率。文献[16]已证明 $P(k) \propto k^{1-\gamma}$,其中 $\gamma = 1 + \frac{\ln 3}{\ln 2} \approx 2.585$,可知阿波罗尼网络的节点度分布服从幂律分布。

1.2.2 平均最短距离

网络中任意两节点之间的最短距离是指从其中一个节点出发到达另外一个节点所要经过的最少边数目。将网络中所有节点对组合的距离进行平均即可得到网络的平均最短距离。可见其刻画的是网络整体的连通性。文献[17]研究得出,阿波罗尼网络的平均最短距离为 $D_{\text{iam}}(S(d,t)) \sim \frac{2t}{d+1}$, d 为维数, t 为迭代步数。

1.2.3 聚类系数

聚类系数定义为复杂网络某节点所有相邻节点也具有相连边的数目占最大可能相连边数目的百分比,即该节点的邻居节点之间的联系紧密程度。网络的聚类系数为所有节点聚类的平均值。文献[17]研究得出,阿波罗尼网络的聚类系数为 $C \approx 0.8284$,可见阿波罗尼网络具有较高的聚类系数。

2 基于复杂网络属性的电网故障综合风险

2.1 综合风险评估

电网宏观上固有的复杂结构属性和微观上元件

的耐受水平区间性都决定了故障后,既会释放出一部分风险,又会存储一部分未释放的风险在电网之中。前者表现为直接的负荷损失以及因电气量超限映射出的负荷损失;后者表现为电气量超限映射出的故障若发生后再导致剩余元件电气量超限映射出的负荷损失。故将前者称为直接风险,后者称为潜在风险^[12]。直接风险的表达式如式(1)所示。

$$R_{\text{-dec}_i} = C_{r_i} \times \left\{ L_{\text{os}_i} + \sum_{j \in n} \left(\frac{C_{r_{ij}}}{\sum_{j \in n} C_{r_{ij}}} \times L_{\text{os}_{ij}} \right) \right\} \quad (1)$$

式中: C_{r_i} 为设备 i 故障的可信性测度,当设备的耐受区间为初始耐受区间时,根据文献[18]的式(7)可得到,在后续仿真中,当设置设备的耐受区间系数 λ 为 1.1 倍、1.2 倍时,通过相应倍增文献[18]式(5)中设备运行状态量的极限值来求取 L_{os_i} 代表设备 i 故障造成的负荷损失; n 为设备 i 故障后造成参数超限的设备数; $C_{r_{ij}}$ 为设备 i 故障后造成设备 j 故障的可信性测度; $L_{\text{os}_{ij}}$ 为因设备 i 故障导致设备 j 故障而引发的负荷损失,这里为了考虑最严重的情况,将由设备 i 故障导致了不同设备 j 故障的严重性值视为最大,直接将其相加。

潜在风险的表达式如式(2)所示。

$$R_{\text{-pot}_i} = \sum_{j \in n} \left\{ (C_{r_i} \times C_{r_{ij}}) \times \left(\frac{C_{r_{ijr}}}{\sum_{r \in m} C_{r_{ijr}}} \times L_{\text{os}_{ijr}} \right) \right\} \quad (2)$$

式中: m 为因设备 i 故障引起设备 j 故障后所有运行超限的设备数; $C_{r_{ij}}$ 和 $L_{\text{os}_{ijr}}$ 为设备 i 故障导致设备 j 故障后设备 r 故障的可信性测度和负荷损失。同式(1),这里考虑了最严重的情况,即将这些设备 j 故障的严重性直接相加。

由式(2)可见,直接风险作为刻画故障在下一层设备中引发的负荷损失期望测度,潜在风险作为刻画故障在再下一层设备中引发的负荷损失期望测度,两者之间存在必然的数学关联关系。而在故障传播中,两者之间的数学关联关系则是由网络的固有结构属性导致,当网络结构一旦确定,上下两层故障之间的关联关系也就自然确定。这种关联性随着故障风险传播的路径不同而不同,故不能直接采用代数和等简单方式处理,因而可利用联系数思想^[14]建立包含不确定关联关系的综合风险指标。

$$R_{\text{tot}_i} = R_{\text{dec}_i} + \mu \cdot R_{\text{pot}_i} \quad (3)$$

式中: R_{tot_i} 为设备*i*的综合风险; R_{dec_i} 为设备*i*的直接风险; R_{pot_i} 为设备*i*的潜在风险; μ 为不确定数。

2.2 基于节点度和聚类系数的不确定数确定

当故障处于初期的累积效应阶段时,如果网络中两节点的度较高,即这两节点联系着较多的元件,则设备开断导致的高风险可由更多路径、更均匀地“分担”出去^[19]。更进一步,当风险从故障元件两端的节点上传播出去后,若这两个节点有较高聚类系数,即与这两个节点相连的邻居节点之间有较紧密的联系,则传播出去的风险会在这个联系紧密的集团区域内部较好地消化掉^[20],从而抑制了故障风险进一步向下传播。而随着故障的发展,当故障已发展到不可逆转的连锁效应阶段时,即网络中元件已普遍累积了较高的故障风险,较高的节点度数和较高的聚类系数则会使分担出去的故障风险在更大范围内的元件运行状态上产生严重影响,导致更大的故障风险发生。可见,在连锁故障发展的不同阶段,结构固有属性中的节点度和节点聚类系数深刻影响着故障后故障风险继续向下一层故障发展的行为,即节点度和节点聚类系数直接映射故障直接风险和潜在风险的关联度。节点度刻画的是风险能被分担出去的途径,节点的聚类系数刻画的是已分担出去的风险在被波及的区域内部的分布情况,两者对故障风险的影响是独立的。综上所述,当故障处于累积效应阶段时,较高的节点度和较高的节点聚类系数有助于抑制故障风险,故直接风险与潜在风险之间的关联度 μ_{ini} 与节点度和聚类系数呈反比,即 $\mu_{\text{ini}} \propto \frac{1}{D}$, $\mu_{\text{ini}} \propto \frac{1}{C}$,故网络中最小的节点度和最小的聚类系数对应着最严重的情况;而当故障处于连锁效应阶段时,关联度 μ_{irr} 与节点度和聚类系数呈正比,即 $\mu_{\text{irr}} \propto D$, $\mu_{\text{irr}} \propto C$,故网络中最大的节点度和最大的聚类系数对应着最严重的情况,归一化后可得累积效应阶段的 μ_{ini} 和连锁效应阶段的 μ_{irr} 如式(4)、式(5)所示。

$$\mu_{\text{ini}} = \frac{C_{\min} \cdot D_{\min}}{C \cdot D} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{irr}} = \frac{C \cdot D}{C_{\max} \cdot D_{\max}} \quad (5)$$

式中: C_{\min} 为网络中节点聚类系数最小的节点的聚类系数; D_{\min} 为网络中节点度最小的节点的度值; C_{\max} 为网络中节点聚类系数最大的节点的聚类系数; D_{\max} 为网络中节点度最大的节点的度值; C 为故障元件两端的节点的聚类系数的平均值; D 为故障元件两端的节点的度的平均值。

进一步可得故障累积效应阶段和连锁效应阶段的综合风险分别如式(6)、式(7)所示。

$$R_{\text{tot}_i} = R_{\text{dec}_i} + \left(\frac{C_{\min} \cdot D_{\min}}{C \cdot D} \right) \cdot R_{\text{pot}_i} \quad (6)$$

$$R_{\text{tot}_i} = R_{\text{dec}_i} + \left(\frac{C \cdot D}{C_{\max} \cdot D_{\max}} \right) \cdot R_{\text{pot}_i} \quad (7)$$

2.3 故障传播的累积效应阶段和连锁效应阶段

根据《美国和加拿大关于 2003 年 8 月 14 日大停电事故总结报告:原因和建议》^[21]以及文献[22]的研究都发现,电网灾难性事故的发展可分为累积效应和连锁效应两个阶段。美加大停电是在经历过较慢的*N*-4 故障过程后才转化为灾难性事件。可见,灾难性事件需经历一个累积阶段后,当电网元件普遍累计的风险饱和之后,累积的风险才雪崩式地释放。国内外学者的研究也发现,复杂电网固有的动力学特性赋予了电网应对设备故障的鲁棒性,但也为电网累积潜在的故障风险提供了温床。电网设备故障导致的风险,又会传递出下一层元件的故障,进而产生下一层故障事件风险,随着故障的发展,将电网的运行状态逐渐转入临界状态,如果此时电网仍未能及时阻断故障,电网运行状态就会进入不可逆的连锁性故障阶段。因此,根据电网灾难性事件的物理属性,可通过分析累积效应阶段和连锁效应阶段的综合风险指标来估计电网风险。下面提出了一种定量刻画这两个过程的方法,可从数学上准确判定累积效应过程和连锁效应过程。

2.3.1 累积效应阶段风险

电网的宏观网络属性和微观元件属性都使得电网应对故障时既会释放部分运行风险,又会通过潮流转移累积潜在风险,从而致使剩余电网元件越限。若故障前电网结构中的潜在风险小于故障后的综合风险,表明此故障发展阶段的电网仍能较好地消纳故障引发的风险。电网运行于故障风险的累积效应阶段,其显著特征可描述为本层故障潜在风险小于

其触发的下一层故障的综合风险,同时本层故障引发的综合风险大于其诱发的下一层故障的综合风险。这种故障风险逐渐递减的趋势,表明网架结构能把故障事件阻断在风险累积阶段,如式(8)、式(9),此阶段的综合风险指标应为式(6)所示。

$$R_{\text{pot}_i} < R_{\text{tot}_j} \quad (8)$$

$$R_{\text{tot}_i} > R_{\text{tot}_j} \quad (9)$$

式中, R_{tot_j} 为因设备 i 故障给下一层设备 j 故障带来的综合风险。

2.3.2 连锁效应阶段风险

网架结构的复杂性在赋予电网对抗故障鲁棒性的同时也为电网发生连锁故障提供了温床^[22]。如果故障使电网不断累积风险,当电网中风险累积已趋于饱和时,即便很小的故障也可能成为压垮电网的“最后一根稻草”,导致之前累积的故障风险呈现雪崩式崩溃,电网故障传播进入难以阻断的连锁效应阶段。因此可见,随着故障事件在累积效应阶段的不断蔓延传播,当电网运行状态达到临界点后,如果电网仍未能阻断故障传播,网架结构中已累积的高风险势必会释放出来,电网进入连锁效应阶段。其显著特征可描述为本层故障直接风险小于引发的下一层故障直接风险,且本层故障引发的综合风险小于其诱发的下一层故障综合风险。这种故障风险传递呈递增趋势,势必引发连锁性故障,电网故障传播将进入难以阻断的连锁效应阶段,风险指标如式(10)、式(11),此阶段的综合风险指标应为式(7)所示。

$$R_{\text{dec}_i} < R_{\text{dec}_{ij}} \quad (10)$$

$$R_{\text{tot}_i} < R_{\text{tot}_{ij}} \quad (11)$$

3 电网灾难性事故评估

3.1 评估模型

电网灾难性事件预警决策系统是评估电网连锁故障风险^[23]的核心模块。预警决策系统通过风险计算模拟构建灾难性事件序列的数据库。当电网实际发生故障时,该系统即可通过匹配识别及时预测出后续的连锁故障事件,以便对电网设备采取有效的控制策略来及时阻断连锁故障。

电网灾难性事件总是由偶然的初始故障引发,

电网中某一设备发生故障后就会诱发电网运行状态的连贯变化,即引发后续的连锁故障。故障发展的初始阶段,电网运行状态处于风险累积效应阶段,当电网中堆积的风险到达濒临崩溃的边缘时,如果电网故障继续产生风险,堆积的故障风险就会快速地、难以逆转地释放出来,故障传播进入连锁效应阶段。正由于释放的过程难以逆转,所以在累积的过程中就要做好充分的准备,将风险限制在缓慢的累积过程中。因而,超前预警故障传播的累积效应阶段和连锁效应阶段是预警电网灾难性事件的关键点。评估算法通过遍历电网中任一设备故障作为初始事件,综合评估故障产生的全部风险来刻画故障传播机理。通过定量对比本层故障引发的风险值与诱发的下一层故障风险值,将电网故障蔓延事件分为累积效应阶段和连锁效应阶段。在故障传播过程中将风险最严重的 10 组事件作为下一层故障的诱发原因,若当该层故障引起电网运行潮流数据不收敛时,或是电网切除的负荷超过 20% 时^[24]判定发生灾难性事件。

3.2 评估算法

基于上述评估算法模型,首先对人工小世界电网、人工阿波罗尼电网和人工无标度电网进行灾难性事件动态综合风险评估,流程具体步骤如下:

1) 建立具有相同节点数的人工小世界和阿波罗尼电网、无标度电网,依据文献[11]中方法对 3 种人工电网的电气参数初始化。再进行初始潮流计算,得出元件承受扰动的初始耐受区间。

2) 分别在元件耐受区间的 100%、110%、120% 时,以 $N-1$ 故障作为初始事件对电网元件进行随机攻击,按照式(6)计算各故障事件的综合风险,并统计每次事件后累积的综合风险与故障元件比例之间映射关系。

3) 按 $N-1$ 故障事件综合风险的降序排序结果,筛选出其中综合风险最高的前 10 组故障事件,逐一剖析各故障触发暴露出的下一层风险设备。

4) 分析残存的网架结构是否已是孤岛,若“是”,则分区域计算电网运行潮流;若“否”,则直接计算故障后的运行潮流。根据潮流结果按式(1)计算元件故障的直接风险,通过式(2)计算元件故障引发的潜在风险,并按式(6)计算出综合风险指标。

5) 定量分析本层元件故障的风险数值和上一层元件故障的风险数值,若式(10)、式(11)成立,则根据式(7)计算故障事件的综合风险,按照风险数值递减规律,将故障排序到连锁效应阶段;若式(8)、式(9)成立,则根据式(6)评估元件故障的综合风险,再根据风险数值递减的规律,将故障排序到累积效应阶段。然后,在本层故障中排序出综合风险最高的前 10 组事件,计算其平均的综合风险值,累积到相应的上一层故障事件中。统计每次事件后累积的综合风险与故障元件比例之间的映射关系。

6) 判断所有网络元件的故障可信性测度是否都小于一个较小的正值 δ ,若“是”,则终止计算;若“否”,则判断是否已到达最大故障层数,或是潮流计算结果已不收敛,若“是”则终止计算,若“否”转入步骤 4。

在第 4.2 节中对实际某地电网进行灾难性评估时,也按以上算法仿真,不同的是其不需要仿真耐受区间为 110%、120%的情况,不需要统计故障元件比例与累积综合风险值,而仅需筛选出最严重的前 10 组故障事件进行风险排序。

4 仿真分析

4.1 人工电网的灾难性事件评估

基于阿波罗尼网络,建立节点数 $n=124$ 、支路数 $l=366$ 的人工阿波罗尼电网,并同时建立具有相同节点数和支路数的人工小世界电网和人工无标度电网对灾难性事件进行仿真分析。通过随机对网络中的某一节点攻击来模拟连锁开断过程,并累计每次故障后的综合风险,得到故障节点数与累积的综合风险之间关系如图 3—图 5 所示。定义元件的耐受区间系数 λ 来表示元件的耐受区间与初始耐受区间的倍数,分别令 λ 为 1.0、1.1、1.2 时,对 3 种人工网络进行灾难性事件仿真。

由仿真分析可知,随着 λ 从 1.0 增加至 1.2,3 种人工电网发生灾难性事件后累积的综合风险值都有减小,但减小幅度都非常有限,小世界电网减小 3%,无标度电网减小 3.5%,阿波罗尼电网减小 3%。可见,对于网络固有的缺陷,通过提高线路的耐受区间等一系列提高电气冗余的方法,不能从根本上改

变网络的固有缺陷,并不能有效地消除网络对于灾难性事件的脆弱性。同时发现:

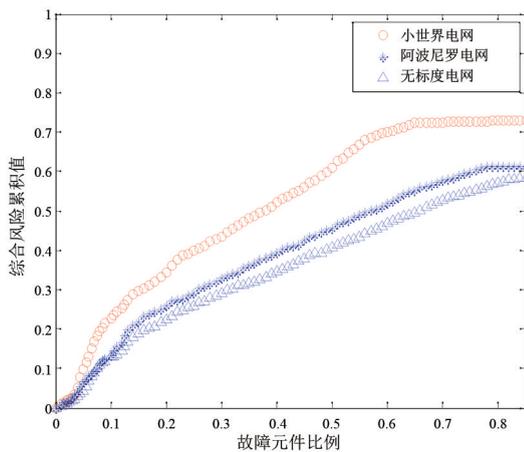


图 3 $\lambda=1.0$ 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较

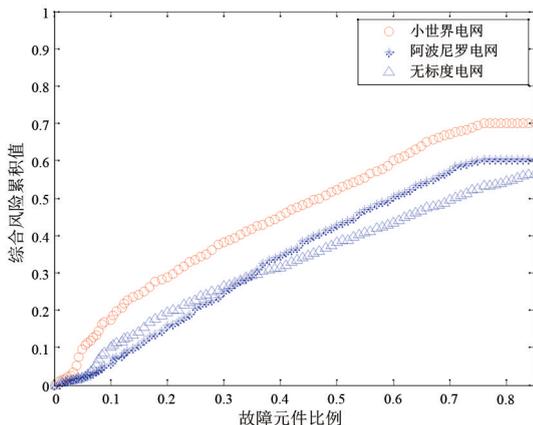


图 4 $\lambda=1.1$ 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较

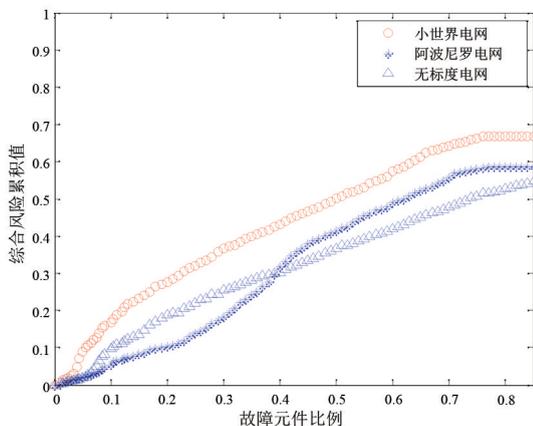


图 5 $\lambda=1.2$ 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较

1) 当 $\lambda=1.0$ 时,阿波罗尼电网的累积风险值位于小世界电网和无标度电网的累积风险值之间。这

是由于阿波罗尼电网具有的较大聚类系数而在电网元件电气冗余 λ 并不足够大的情况下,较大聚类系数对于故障风险的扩散起着助推的作用,从而使得阿波罗尼电网累积的风险值位于无标度电网之上。与此同时,阿波罗尼电网节点度的幂律分布,又使得其不至于发生如小世界电网那样整体规模的大停电,故其累积的风险值位于小世界电网之下。

2) 当 λ 从 1.0 增加到 1.1 时,由于阿波罗尼电网中元件电气冗余的提高,此时较大的聚类系数发挥出对连锁故障良好的抑制效应。故障元件附近具有较大聚类系数的节点如同故障风险的“蓄水池”,使得阿波罗尼网在灾难性事件初期,网络中的故障风险可以较平稳地累积在这个“蓄水池”之中。其数学形式表现为电网灾难性事件的累积效应阶段可以更好地分担消纳故障风险,故此阶段的累积风险明显减小。因而在累积效应阶段,阿波罗尼电网的累积风险值小于无标度电网的累积风险值。而当故障发生到一定阶段,“蓄水池”已经装满后,即电网中累计的风险趋于饱和后,阿波罗尼电网中较大的聚类系数使得即便是轻微的故障风险传播都会引起更大范围的故障风险暴露出来,从而使得故障可以更广泛地传播。故此阶段阿波罗尼电网累积的风险显著扩散上升,其超过无标度电网累积的风险值。

3) 当 λ 从 1.1 增加到 1.2,元件具有较大的冗余时,阿波罗尼电网较大的聚类系数使得其在故障发生初期具有良好风险消纳能力。且随着 λ 从 1.1 增加到 1.2,阿波罗尼电网中较大的聚类系数对抑制电网灾难性事件从起正面作用转为起负面作用,即阿波罗尼电网与无标度电网的交点往后推延。但当网络中累积的风险饱和后,较大的聚类系数仍然会展现出对电网不利的一面,导致网络故障风险广泛扩散上升,最终仍位于小世界电网和无标度电网累积的风险之间。可见,网络较大的聚类系数并不是一味地对电网安全不利。节点较大的聚类系数,使得在其附近形成了一个类似暂存风险的“蓄水池”,而“蓄水池”的容积与元件的电气冗余正相关。这种由网络结构固有属性产生的故障风险“蓄水池”有助于推延故障事件进入连锁效应阶段的时间点,但并不能削弱最终崩溃后的影响。

综上,式(6)、式(7)中建立的节点聚类系数和

节点度数在故障传播的不同阶段对电网运行风险的不同映射关系在本节仿真中得以证明,验证了所提式(6)、式(7)的正确性和合理性。

4.2 西部某地区电网灾难性事件评估

根据西部某地区实际电网建模,将 110 kV 等级及以上的变电站等效为母线节点,如图 6 所示。对网络结构属性进行统计,等效后网络共有 40 个节点、56 条边,平均度数为 2.8,节点的度分布区间在 $[1, 12]$ 内,其节点度分布如图 7 所示,该地区电网节点度分布具有较明显的幂律分布规律。统计该地区电网的其他网络属性,并与具有相同节点数和平均度数的随机网络相比,发现其聚类系数比随机网络大,其平均最短距离比随机网络小,可见其具有小世界效应。综上,该地区电网属于兼具小世界效应和无标度拓扑的阿波罗尼构造网络。

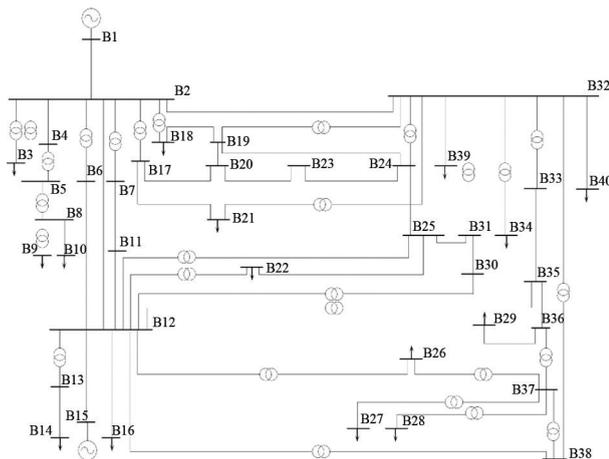


图 6 西部某地区电网

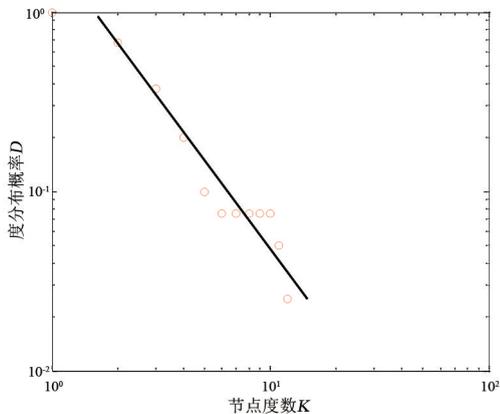


图 7 西部某地区电网节点度分布

分别采用所提方法以及文献[12]中确定 μ 的方法,对该地区电网进行灾难性评估,其累积效应阶段和连锁效应阶段所得结果分别如表 1—表 2 所示。

表 1 某地电网累积效应阶段灾难性事件排序

层数	传统 $\lambda = 1$ 方法	所提方法
1	$L_{2-12}, L_{32-38}, L_{12-38},$ $L_{32-40}, L_{12-15}, L_{37-38},$ $L_{2-8}, L_{37-38}, L_{12-16}, L_{2-4}$	$L_{12-15}, L_{2-4}, L_{37-38}, L_{1-2},$ $L_{2-12}, L_{2-8}, L_{12-38}, L_{2-32},$ L_{32-38}, L_{12-16}
	$(L_{1-2}, L_{2-8}), (L_{1-2}, L_{2-4})$ $(L_{2-8}, L_{2-4}), (L_{12-15}, L_{12-16})$ $(L_{32-38}, L_{12-38}), (L_{32-38}, L_{37-38})$ $(L_{32-38}, L_{12-38}), (L_{12-15}, L_{12-38})$ $(L_{12-16}, L_{12-38}), (L_{32-40}, L_{32-38})$ (L_{1-2}, L_{2-12})	$(L_{12-15}, L_{12-38}), (L_{12-16}, L_{12-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-8}), (L_{1-2}, L_{2-4})$ $(L_{2-12}, L_{12-15}), (L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{2-12}, L_{12-16}), (L_{2-4}, L_{2-8})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}), (L_{12-38}, L_{37-38})$
2	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{37-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-15})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-16})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{2-8})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{2-4})$ $(L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-15})$ $(L_{32-38}, L_{37-38}, L_{12-38})$	$(L_{12-15}, L_{12-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{2-4})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{1-2})$ $(L_{12-16}, L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{1-2})$
	3	

表 2 某地电网连锁效应阶段灾难性事件排序

层数	传统 $\lambda = 1$ 方法	所提方法	
4	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-32})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{12-12})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-15})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-16})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{37-38}, L_{12-38})$ $(L_{12-15}, L_{12-38}, L_{37-38}, L_{32-38})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{12-16})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-15})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$	
	5	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-12}, L_{12-15})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-32}, L_{32-38})$ $(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-15}, L_{12-16})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38})$	$(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38})$ $(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38}, L_{32-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$ $(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38}, L_{32-38})$ $(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38})$

由仿真结果分析,在累积效应阶段传统方法和所提方法虽然筛选出的故障事件序列具有较大的相似度,但综合风险排序的结果有明显不同。以累积效应阶段的 $N-1$ 故障为例,传统方法令 $\mu = 1$,故而放大了潜在风险在累积效应阶段的影响,故在传统方法 $N-1$ 排序中,将一些实际负载量并不大的联络元件 $L_{2-12}, L_{32-38}, L_{12-38}$ 等排到了最前,而所提方法较好地兼顾了直接风险和潜在风险对电网的综合影响,将 $L_{12-15}, L_{2-4}, L_{37-38}$ 等自身既有较大负载量,又与联络元件有连接关系的关键元件排在了最前面。可见,所提方法在灾难性事件评估的累积效应阶段没有像传统方法那样放大潜在风险的危害,准确合理地评估了事件直接风险和潜在风险对电网的真实影响。

再以连锁效应阶段中故障传播到第 5 层为例,此时的电网状态已经非常脆弱,电网中已累积了较多的风险,此时隐藏在电网中的潜在风险随时都会发生“雪崩”。故而在此状态下,传统的固定系数方法又轻视了潜在风险的影响,而所提方法通过建立网络参数中的节点聚类系数和节点度数在故障发展的不同阶段的影响映射,达到了既未放大也未缩小潜在风险对电网的影响。故,所提方法将 $(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38}, L_{37-38}), (L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38}, L_{32-38})$ 等既使电网丢失较大负荷又将电网分割为一系列孤岛的故障序列排在最前列。可见,所提方法得出的结果去除了传统方法中过于乐观或过于保守的成分。

5 结 论

1) 对 3 种人工电网的灾难性事件评估结果来看,提高网络中元件的电气冗余,对于减小灾难性事件最终造成的后果都没有明显的改变。可见网络结构一旦形成之后,其自身固有的脆弱性并不能通过改善元件级别的电气冗余来得以弥补。并且仿真结果验证了所提出的不同故障传播阶段节点聚类系数和节点度数对故障风险的不同映射关系的正确性。

2) 从实际工程角度的仿真结果验证了所提出的具体刻画联系度 μ 方法的合理性,方法通过去除传统方法评估结果过于乐观和过于保守的不足,更准确地评估出故障事件的真实影响,评估结果更符合工程实际认识。

3) 但需警惕的是,通过提高电气冗余不能祛除电网固有缺陷,只能推迟灾难性事件的发生,而不能消除灾难性事件的发生。所以,运行调度人员应该充分利用故障风险累积阶段中阿波罗尼网络较大的聚类系数抑制故障的扩散、推迟进入连锁效应阶段的灾变点等有利条件,防止电网进入不可逆转连锁效应阶段。

参考文献

[1] 曹一家,郭剑波,梅生伟,等.大电网安全性评估的系统复杂性理论[M].北京:清华大学出版社,2010.
[2] T J Overbye, C L De Marco. Voltage security enhancement using energy based sensitivities [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1991, 6(3) : 1196-1202.

参考文献

- [1] 卢加林.500kV CVT 接线板放电故障排查及处理[J].机电信息,2020(9):37-39.
- [2] 韩纪层,何建,林德源,等.某变电站电容式电压互感器附件 L 型接线板的断裂原因[J].机械工程材料,2020,44(7):98-102.
- [3] 徐贤,吴国忠,包艳蓉,等.变电站铝设备线夹断裂事故分析[J].热加工工艺,2012,41(7):191-192.
- [4] 罗宏建,龚卓,王炯耿,等.铝合金设备线夹失效分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(5):44-48.
- [5] 董芝春,何凤生,张春雷.输电线路耐张线夹的结构优化[J].广东电力,2013,26(12):60-63.
- [6] 王飞龙.某 220 kV 电流互感器接线板发热缺陷处理与改进方案[J].黑龙江电力,2020,42(1):74-78.
- [7] 陈云,杨丙坤,郝文魁,等.两种铝合金接线板耐蚀性能的研究[J].腐蚀科学与防护技术,2019,31(6):583-589.
- [8] 王天鹏,李宏强,孙明成,等.沿海变电站 66 kV HGIS 套管接线板镀银层腐蚀剥落原因分析[J].腐蚀科学与防护技术,2019,31(2):159-164.
- [9] 黄丰,肖凯,李鹏云,等.变压器接线板失效分析[J].铸造技术,2013,34(1):48-50.
- [10] 陈家慧,刘曦,冯杰,等.变电站铝合金接线板失效分析[J].腐蚀与防护,2020,41(12):70-74.
- [11] 王森.折棱管吸能构件模具的优化及有限元分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- 作者简介:**
陈家慧(1991),女,博士,工程师,研究方向为电网设备金属失效分析及新材料研究。(收稿日期:2021-09-05)
- (上接第 81 页)
- [3] Ian Dobson I, Benjamin A Carreras, Vickie E Lynch, et al. Estimating failure propagation in models of cascading blackouts [J]. Probability in engineering and informational sciences, 2005, 19(4):475-488.
- [4] 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.
- [5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.
- [6] 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[J].电力系统自动化,2006,30(8):7-10.
- [7] Albert-László Barabási, Réka Albert. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [8] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the North American power grid [J]. Physical Review E, 2004, 69(2):1-6.
- [9] David P Chassin, Christian Posse. Evaluating North American electric grid reliability using the Barabási-Albert network model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Application, 2005, 355(2-4):667-677.
- [10] 刘润然.复杂网络上的几种动力学过程研究[D].合肥:中国科技大学,2011.
- [11] 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.
- [12] 崔振,肖先勇,冯岗,等.基于综合风险的电网灾难性事件预警评估[J].华东电力,2012,40(9):1507-1511.
- [13] 刘宝碇,彭锦.不确定性理论教程[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [14] Liu Baoding, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010. <http://orsc.edu.cn/liu>.
- [15] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2007.
- [16] José S Andrade, Hans J Herrmann, Roberto F S Andrade, et al. Apollonian Networks: Simultaneously Scale-Free, Small World, Euclidean, Space Filling, and with Matching Graphs [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(1):018702.
- [17] 章忠志,荣莉莉.具有无尺度拓扑和小世界效应的 Sierpinski 网络 [J]. 系统工程学报, 2007, 22(4):337-343.
- [18] 崔振,肖先勇,马超,等.基于电网剖分与不确定性测度的电网灾难性事件评估[J].电力系统保护与控制,2011,39(20):30-37.
- [19] 宁宣熙.堵塞流理论及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [20] 白晓明,张伯明.大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [21] U. S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada; Causes and Recommendations [R]. https://www.ewh.ieee.org/r6/san_francisco/pes/pes_pdf/Northeast_Blackout_Final.pdf.
- [22] 丁道齐.复杂大电网安全性分析——智能电网的概念与实现[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [23] 田世明,陈希,朱朝阳,等.电力应急管理平台研究[J].电网技术,2008,32(1):26-30.
- [24] Jagabondhu Hazra, Avinash K Sinha. Identification of Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1):378-387.
- 作者简介:**
张灏(1968),男,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为电网经营管理及综合风险评估。(收稿日期:2021-10-07)