DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201509

基于交流潮流的连锁故障建模与鲁棒性评估

胡福年，陈灵娟，陈 军

（江苏师范大学电气工程及自动化学院，江苏 徐州 221116）

摘要：连锁故障是历次大停电事故的主要诱因之一，而脆弱线路对连锁故障演化路径的发展又起着极其关键的作用。为在连锁故障中识别电网潜在脆弱线路，基于复杂网络理论和电力系统实际特性，以线路视在功率值为线路流量，提出一种交流潮流连锁故障模型。在此基础上，从网络局部、全局和潮流功能特性三个方面分别提出电气入度中心性、电气出度中心性、电气介数中心性和加权电网潮流转移熵四个指标来辨识脆弱线路。最后通过 6 个 IEEE 标准测试系统对电网鲁棒性进行评估，结果表明基于电气入度中心性指标的蓄意攻击策略对电网连锁故障后造成的损害最大且随网络规模增加电网鲁棒性逐步提升。

关键词：连锁故障；交流潮流；复杂网络；脆弱线路

Cascading failure modeling and robustness evaluation based on AC power flow

HU Funian, CHEN Lingjuan, CHEN Jun

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Cascading failures are one of the main causes of blackouts, and fragile lines play an extremely critical role in the evolution of cascading failures. To identify potential fragile lines in cascading failures, based on complex network theory and actual characteristics of power systems, taking line apparent power as line flow, an AC power flow cascading failure model is proposed. Four indicators of electrical in-degree electrical out-degree, and electrical betweenness centrality, as well as weighted power flow transfer entropy are proposed to identify vulnerable lines from the three aspects of network local, global and power flow functional characteristics. Finally, the robustness of the power grid are evaluated through 6 IEEE standard test systems. The results show that the deliberate attack strategy based on the electrical in-degree centrality index will cause the greatest damage to the grid after a cascading failure, and the robustness of the power grid will gradually increase as the network scale increases.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61773186) and the Graduate Research Innovation Project of Jiangsu Normal University (No. 2020XKT077).

Key words: cascading failures; AC power flow; complex network; vulnerable transmission lines

0 引言

电力系统连锁故障一般是由单一元件过载继而引发其他元件相继过载的级联过程，也是近年来诸多大停电事故的主要诱因[1-2]。2019 年 8 月 9 日，英国的大规模停电事故造成诸如伦敦等中枢城市受到严重影响，影响人口约 100 万，总负荷损失约 3.2%[3-4]。电网具有无标度特性，即存在少量故障概率很低的易传播线路，一旦故障将导致电力系统快速崩溃[5]。因此研究电力系统连锁故障演化路径并对其鲁棒性进行评估分析，对进一步提出有效的预防和缓解措施，以大大降低连锁故障风险并增强电网的弹性有重要意义[6-12]。

目前连锁故障的建模主要分为两类：第 1 类为以 OPA 模型[13]、Markov chain 模型[14]、隐性故障模型[15]、CASCADE 模型[16]为代表的复杂网络模型；第 2 类为以随机模拟模型[17-18]、事故链模型[19-20]为代表的电力系统模型。文献[21]综合相关性和可能性来考察潮流转移对故障的影响，并以两者均超过阈值来定义后续故障；文献[22-23]采用扩展的 Gillespie 方法改进 Markov chain 模型来分析电网鲁棒性，发现与常规网络结构相比，小世界网络结构将更广泛更快地传播级联故障。文献[24]改进隐性

基金项目：国家自然科学基金项目资助(61773186)；江苏师范大学研究生科研创新计划项目资助(2020XKT077)

故障模型，以保护失效严重度定义模型权重以评估电网故障后鲁棒性。复杂网络模型从拓扑角度衡量系统脆弱性，但对电力系统实际动态特性反应不足；电力系统模型精度高但计算复杂度高，难以适应工程实时调度。

现阶段脆弱环节的辨识主要有静态分析和动态辨识两大类。基于复杂网络理论的指标是从静态分析角度来评估脆弱环节的[25]；文献[26-27]引入潮流特性，改进复杂网络指标以量化脆弱环节对电网鲁棒性的影响程度；文献[28]定义网络能力和脆弱性指数来辨识加权网络脆弱节点；文献[29-30]分别采用改进的结构孔理论、基于度值和线路重要性的方法来评估系统脆弱性。上述纯拓扑指标在实时反映潮流对系统的影响程度，以及全面辨识系统脆弱环节方面还需要做大量的工作。

为克服直流潮流模型难以反映连锁故障演化路径中无功特性的缺点，本文建立交流潮流连锁故障模型。为弥补复杂网络纯拓扑指标难以反映电力系统实际特性等不足，本文从局部、全局和潮流特性方面分别采用电气入度中心性、电气出度中心性、电气介数中心性和加权电网潮流转移熵 4 个指标辨识电网脆弱线路并据此确定对应的蓄意攻击策略。最后通过 6 个 IEEE 典型测试系统对电网遭受不同蓄意攻击后的鲁棒性进行评估并探索网络规模变化与鲁棒性之间的关系，为电网进行更优的故障预警策略和韧性提升方案提供了理论依据。

1　连锁故障建模

电网可以建模为由 n 个节点和 m 条线路组成的加权有向网络，发电机节点和负荷节点简化为复杂网络的节点，传输线路和变压器支路简化为复杂网络的线路。复杂网络模型可由 $G=(V, E, W)$表示，其中，V 和 E 分别表示节点集和线路集，W 表示线路权值。由于远距离输电线路电阻值 r_{ij} 远小于电抗值 x_{ij}，故忽略电阻值的影响，仅以输电线路的电抗值作为电网的权重，并以输电线路传输有功功率流的方向定义线路方向。由此复杂网络邻接矩阵中单个元素可表示为

$$w_{ij}=\begin{cases}x_{ij}\\0\end{cases} \tag{1}$$

式中：w_{ij} 表示电力系统中线路 ij 的权值；x_{ij} 表示节点 i、j 之间的等值电抗。

交流潮流遵循 Kirchhoff 定律，其有功无功特性可表示为

$$\begin{cases}P_{ij}=(V_i^2-V_iV_j\cos\theta_{ij})g_{ij}-V_iV_jb_{ij}\sin\theta_{ij}\\Q_{ij}=-(V_i^2-V_iV_j\cos\theta_{ij})b_{ij}-V_iV_jg_{ij}\sin\theta_{ij}\end{cases} \tag{2}$$

式中：P_{ij} 和 Q_{ij} 分别表示线路 ij 上的有功和无功潮流；V_i 和 V_j 分别表示节点 i 和节点 j 的电压幅值；θ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的电压相角差；g_{ij} 和 b_{ij} 分别表示线路 ij 的电导和电纳值。

由于超高压输电线路上存在较大功率损耗，因此可将线路流量定义为线路两端节点视在功率的平均值，如式(3)。

$$s_{ij}=\frac{1}{2}\left(\sqrt{p_{\text{from}}^2+q_{\text{from}}^2}+\sqrt{p_{\text{to}}^2+q_{\text{to}}^2}\right) \tag{3}$$

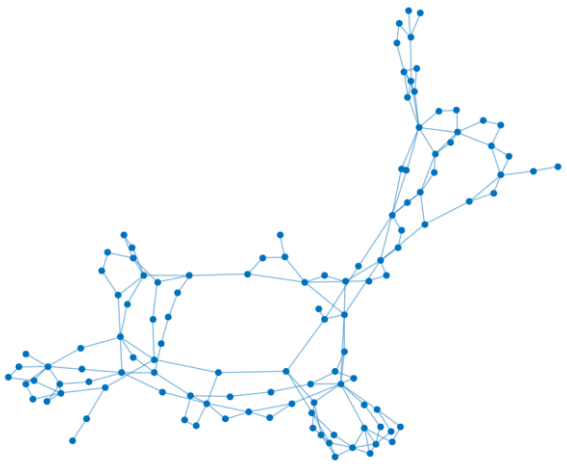
式中：s_{ij} 表示流过输电线路的流量值；p_{from}、q_{from}、p_{to}、q_{to} 分别表示线路始末两端节点对应的有功功率和无功功率值。

电力系统中输电线路允许传输的最大容量即为输电线路的容量阈值，为反映输电线路容量阈值对连锁故障演化路径的影响，引入容忍系数 α 进行评估分析。

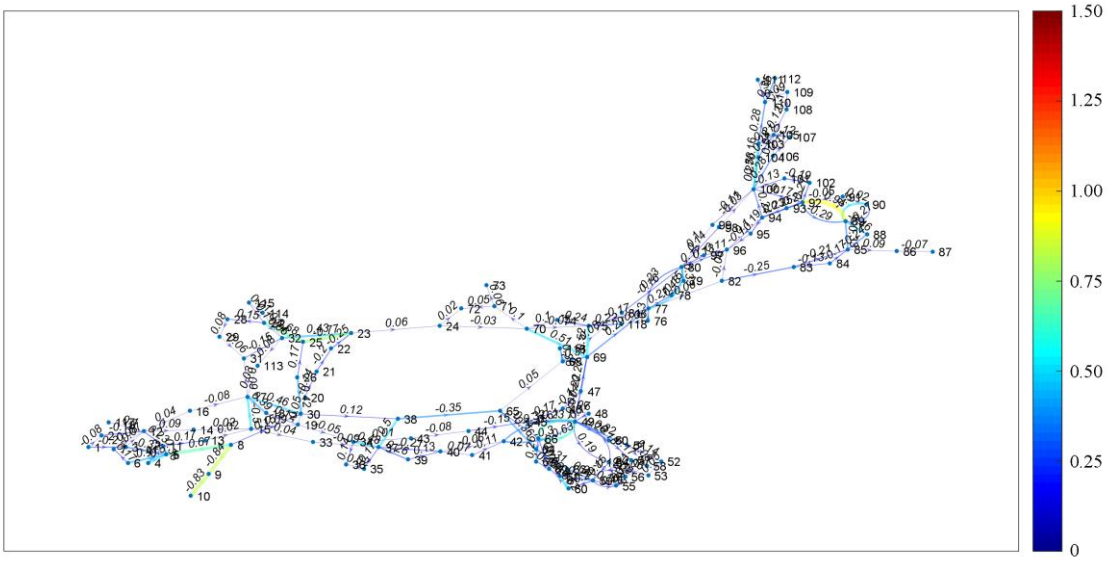
$$c_{ij}=\alpha\cdot s_{ij} \tag{4}$$

式中：α 表示容忍系数；c_{ij} 表示输电线路的容量；s_{ij} 表示输电线路传输的流量。

电网中若初始故障导致线路流量超过线路阈值，则会引起连锁故障。由于高压输电线路的继电保护装置在线路流量超过容量时会立即动作，因此本文假设线路过载立即导致其退出运行。以 IEEE118 测试系统为例，上述过程可将复杂网络理论中图 1(a)的无权无向拓扑模型建模为图 1(b)中权值为线路电抗，方向为有功功率方向，流量为线路视在功率值的连锁故障网络图，以线路容量与流量之比定义线路过载率，则图 1(b)可直观显示 IEEE118 节点系统初始过载率。



(a) IEEE118 节点系统拓扑图



(b) IEEE118 节点系统连锁故障网络图

图 1　IEEE118 节点系统

Fig. 1 IEEE118-bus system

2　脆弱线路辨识指标

基于电网局部、全局结构特性以及电力系统运行潮流功能特性，建立电气入度中心性、电气出度中心性、电气介数中心性和加权电网潮流转移熵 4 个脆弱线路辨识指标。

2.1 电气度中心性

复杂网络理论定义节点 i 的度为与其直接相连边的数目，考虑到基于交流潮流的连锁故障模型加权有向特性，对入度和出度分别进行定义：节点 i 的出度定义为节点 i 指向其他节点的输电线路的流量 s_{ij} 之和；节点入度定义为从其他节点指向节点 i 的输电线路的流量 s_{ji} 之和。

$$DC_i^{\text{out}} = \frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N} s_{ij} \tag{5}$$

$$DC_i^{\text{in}} = \frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N} s_{ji} \tag{6}$$

式中：DC_i^{out} 和 DC_i^{in} 分别表示节点 i 的入度中心性和出度中心性；N 表示电网中节点总数。DC_i^{out} 和 DC_i^{in} 的取值范围均为 0.0~1.0，0.0 表示孤立节点，1.0 表示与电网中所有节点间均存在输电线路。

电气度中心性指标综合线路传输的有功功率和无功功率两种电网功能特性，结合复杂网络理论中关于节点度值的定义，从网络局部角度评估节点重要程度，其值越大表明节点越重要。对脆弱线路进行辨识时，首先辨识出电气入度中心性指标值最高和电气出度中心性指标值最高的的节点，接着选取与其相连流量值最大的输电线路为脆弱输电线路。

2.2 电气介数中心性

复杂网络理论定义边的介数为网络中任意两节点间最短路径中经过边的次数与最短路径总数的比值，从网络全局角度表征线路在流量传输中的重要程度。基于复杂网络理论，可将边介数作为从全局拓扑角度衡量输电线路重要性的指标。但电力系统连锁故障模型中，线路潮流遵循 Kirchhoff 定律沿所有可能路径传输，由此将线路视在功率引入边介数，改进线路 i 的介数为经过输电线路 i 的次数与遵循 Kirchhoff 定律的所有路径的比值，从全局角度评估影响电力系统稳定运行的脆弱线路。

$$BC_i = \frac{1}{N(N-1)/2}\sum_{s\neq v\neq t\in V}\frac{\sigma_{st(v)}}{\sigma_{st}} \tag{7}$$

式中：σ_{st} 表示发电节点 s 到负荷节点 t 的所有可能路径数目之和；$\sigma_{st(v)}$ 表示发电节点 s 到负荷节点 t 的所有可能路径中经过线路 v 的数目之和；N 表示电网中节点总数。

电气介数中心性指标与复杂网络介数中心性指标均为评估输电线路脆弱性的全局性能指标，但电气介数指标考虑到电网实际运行中的潮流特性，更符合真实电力系统实际特性，且与输电线路脆弱性呈正相关。

2.3 加权电网潮流转移熵

熵是反映系统分布状态混乱性和无序性的度量标准，电力系统作为功率平衡系统，其内部稳定程度可以通过熵的大小来反映。定义电力系统连锁故障模型的加权电网潮流转移熵为

$$H^m = -\sum_{k=1}^{l} \eta_k^m \ln \eta_k^m \tag{8}$$

式中：l 表示节点 k 的出线数目；η_k^m 为节点 k 在第 m 级级联过程中的标准化潮流值，可由式(9)求得。

$$\eta_k^m = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^{L} f_{ij}} \tag{9}$$

加权电网潮流转移熵指标可以反映线路出度和负载分布均匀程度对电网鲁棒性的影响。线路出度越大表明负载分布越均匀，熵值越大。对脆弱线路进行辨识时，定义与加权电网潮流转移熵指标值最高的节点相连的流量最大的线路为脆弱输电线路。

3 鲁棒性评估

3.1 攻击模式

电网具有无标度特性，即在抵御随机攻击方面具有较强鲁棒性而在抵御蓄意攻击方面具有较强脆弱性，因此辨识电网脆弱环节并提前采取适当的故障预警措施，对电网的安全稳定运行具有重要意义。为评估电网在不同蓄意攻击下鲁棒性，基于第 2 章所提脆弱线路辨识指标，定义 4 种蓄意攻击模式：

1) 基于电气入度中心性的蓄意攻击(Indegree Based Attack, IDBA)：攻击电气入度指标值最高的输电线路。

2) 基于电气出度中心性的蓄意攻击(Outdegree Based Attack, ODBA)：攻击电气出度指标值最高的输电线路。

3) 基于电气介数的蓄意攻击(Betweenness based Attack, BBA)：攻击电气介数指标值最高的输电线路。

4) 基于加权电网潮流转移熵的蓄意攻击(Weighted power flow transfer entropy based attack, WBA)：攻击加权电网潮流转移熵指标值最高的输电线路。

3.2 鲁棒性评估指标

为克服复杂网络中纯拓扑鲁棒性评估指标难以全面表征电力系统运行特性、无法真实反映连锁故障后电网解列程度的缺点，定义线路存活率、功率存活率和容量存活率 3 个指标分别从结构和功能两个方面对电网连锁故障演化进程及其鲁棒性进行评估。

1) 线路存活率

复杂网络理论中网络效率仅考虑两节点间最短路径而对电网物理特性考虑欠妥；最大团尺寸仅考虑电网解列后的最大连通子电网不够充分；连通度指标仅考虑故障前后发电节点数量比值，没有考虑负荷节点和传输节点对连锁故障造成的影响。因此结构方面用线路存活率指标取代上述复杂网络鲁棒性指标进行评估。线路存活率定义为连锁故障前后系统中正常工作的输电线路的比值。

$$LS = \frac{L_{\text{damg}}}{L_{\text{norm}}} \tag{10}$$

式中，L_{damg} 和 L_{norm} 分别表示连锁故障结束后未过负荷、未因继电保护装置动作而跳闸或与发电机断开连接的线路和电网原始线路数量。

2) 容量存活率

容量存活率定义为连锁故障结束后仍然处于正常运行状态的输电线路的容量与电网初始交流潮流下总容量的比值。

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{L_{\text{damg}}} C_{\text{damg}}}{\sum_{j=1}^{L_{\text{noml}}} C_{\text{norm}}} \tag{11}$$

式中，C_{damg} 和 C_{norm} 分别表示连锁故障结束后仍然处于正常运行状态的输电线路的容量总和与初始正常输电线路容量总和。

3) 功率存活率

功率存活率定义为连锁故障结束后形成的孤岛中仍然满足需求的有功功率与初始总有功功率的比值。

$$PS = \frac{\sum_{i=1}^{B_{\text{damg}}} P_{\text{damg}}}{\sum_{j=1}^{B_{\text{noml}}} P_{\text{norm}}} \tag{12}$$

式中，P_{damg} 和 P_{norm} 分别表示连锁故障结束后仍然满足负荷需求的有功功率与电网初始总有功功率。

3.3 评估流程

基于交流潮流的连锁故障模型的主要过程如下：首先基于第 2 章所提脆弱线路辨识指标确定电力系统脆弱线路并使其退出运行；其次根据交流潮流计算结果确定新的系统状态，交流潮流不收敛时按比例减少发电量和负荷需求；如果减载 50 次后潮流仍不收敛，则使过载线路退出运行并重新计算潮流。重复上述过程，直到所有解列后的孤岛中没有过载线路为止，最后通过线路存活率、容量存活率和功率存活率来评估级联故障结束后电力系统的鲁棒性。图 2 可直观显示连锁故障遭受初始攻击后形成的各个孤立岛屿的演化路径。

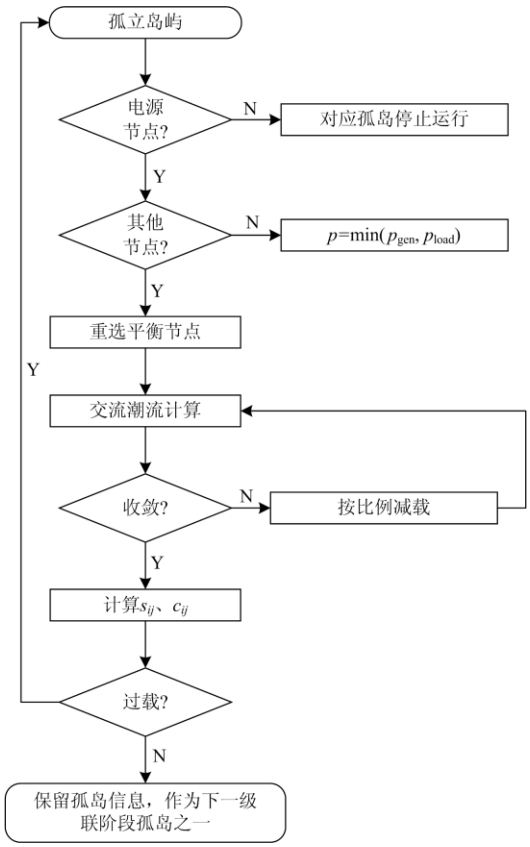


图 2 连锁故障各孤岛评估流程图

Fig. 2 Flow chart of cascading failure assessment of each island

图中：s_{ij}、c_{ij} 分别表示线路 ij 上的流量和容量值；p、p_{gen} 和 p_{load} 分别表示孤岛中电源节点对应的当前有功功率、该节点发电机发出的有功功率和该节点负载需求的有功功率。

4　算例分析

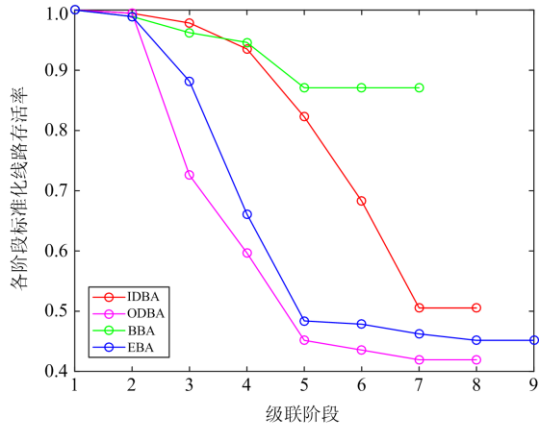
为模拟连锁故障演化路径并对其鲁棒性进行评估，以 Matpower7.0 中 IEEE 典型测试系统为例进行评估分析。

4.1 鲁棒性评估方法可行性分析

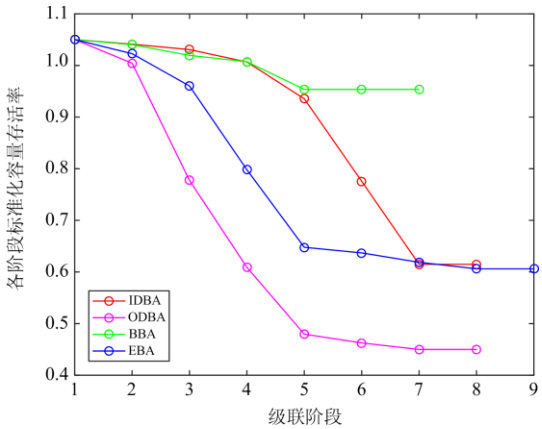
以 IEEE118 标准测试系统为例，首先以第 2 章所提脆弱线路辨识指标确定系统初始故障线路，再分析电力系统在定容忍系数 α 和变容忍系数两种情况下连锁故障演化路径，最后以 3.2 节所提鲁棒性评估指标分析电网遭受蓄意攻击后的鲁棒性。

1) 连锁故障演化路径分析

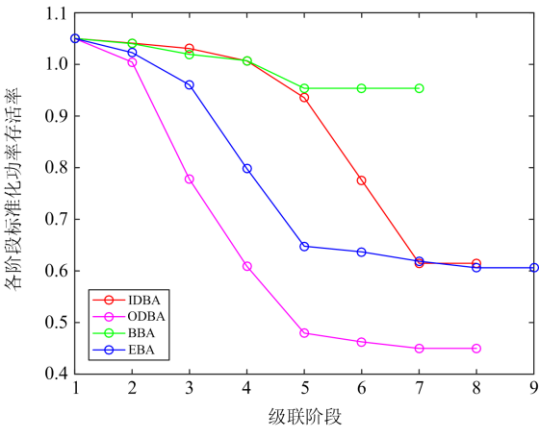
以容忍系数 $\alpha=1.5$ 为例，分析电网连锁故障演化路径在不同攻击策略下线路存活率、容量存活率和功率存活率变化情况，图 3 显示了不同攻击策略下各评估指标变化情况。



(a) 不同攻击策略下连锁故障每个阶段线路存活率



(b) 不同攻击策略下连锁故障每个阶段容量存活率



(c) 不同攻击策略下连锁故障每个阶段功率存活率

图 3 给定容忍系数，不同攻击策略下鲁棒性变化情况

Fig. 3 Given the tolerance coefficient, the robustness changes under different attack strategies

为直观反映不同攻击策略在交流潮流连锁故障演化路径中的变化情况，对不同攻击模式下的初始故障线路、级联深度、鲁棒性评估指标变化情况进行统计分析，如表 1 所示。

表 1 不同攻击策略下连锁故障演化路径及其评估

Table 1 Evolution path and evaluation of cascading failures under different attack strategies

攻击模式	初始故障线路	级联深度	线路存活率	容量存活率	功率存活率
IDBA	[5,6]	8	0.505 4	0.614 7	0.552 1
ODBA	[8,9]	8	0.419 4	0.449 9	0.460 4
BBA	[77,80]	7	0.871 0	0.953 7	0.885 9
EBA	[49,66]	9	0.451 6	0.606 1	0.525 9

综合图 3 和表 2，可得如下结论：

① 针对加权电网潮流转移熵指标采取的蓄意攻击策略，对应更高的级联深度。级联深度越大，电力系统运行调度人员有更多时间启动继电保护装置，有助于阻碍连锁故障的传播。

② 针对电气出度中心性指标采取的蓄意攻击策略，级联深度低于基于加权电网潮流转移熵指标采取的蓄意攻击策略，但造成的损失相对最大，对应的鲁棒性评估指标分别为：线路存活率 0.419 4；容量存活率 0.449 9；功率存活率 0.460 4。

③ 针对电气介数中心性指标采取的蓄意攻击策略，对应指标值为 7 的级联深度和鲁棒性评估指标分别为 0.871 0、0.953 7、0.885 9 的线路存活率、容量存活率和功率存活率。相比其他两种蓄意攻击策略，对电网造成的影响较小。

④ 针对电气入度中心性指标采取的蓄意攻击策略，虽然级联深度与基于电气出度中心性指标采取的蓄意攻击策略相同，但对电网造成的损失与基于电气出度中心性指标采取的蓄意攻击策略相比却有差距，相差分别为线路存活率 0.086 0、容量存活率 0.164 8、功率存活率 0.091 7。表明高出度节点对应的输电线路故障时易引发线路潮流转移，对电网造成的损失更大。

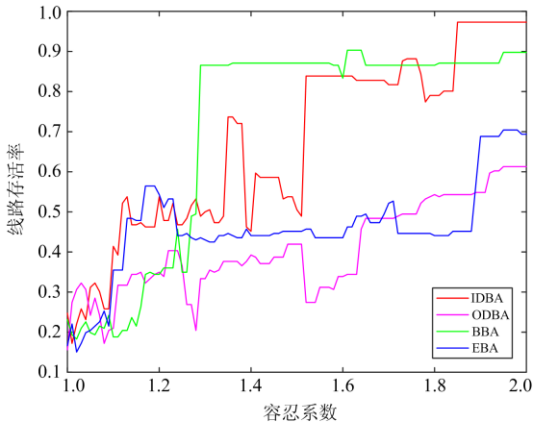
2) 容忍系数对鲁棒性影响分析

为评估容忍系数变化对电网连锁故障结束后鲁棒性的影响程度，给定容忍系数变化范围 $\alpha \in (1,2)$，当级联过程结束时，以鲁棒性评估指标从结构和功能角度分别评估电网鲁棒性，结果如图 4 所示。

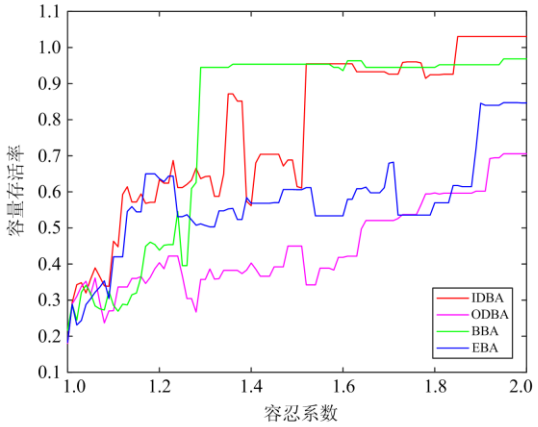
对图 4 进行分析可以发现：

① 容忍系数与鲁棒性评估指标之间的关系是非线性的，但对于一般长期趋势而言，容忍系数的增加仍然会提高电网的鲁棒性；

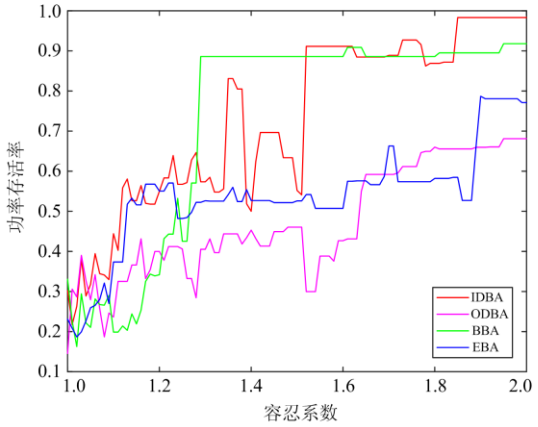
② 基于电气出度中心性指标的蓄意攻击模式中，即使对于容忍系数值为 2.0 的情形，其线路存活率、容量存活率和功率存活率也只到 0.612 9、0.705 4 和 0.681 0，说明相比其他三种蓄意攻击策略，基于电气出度中心性指标的蓄意攻击对电网鲁棒性造成的威胁更显著。



(a) 线路存活率变化情况



(b) 容量存活率变化情况



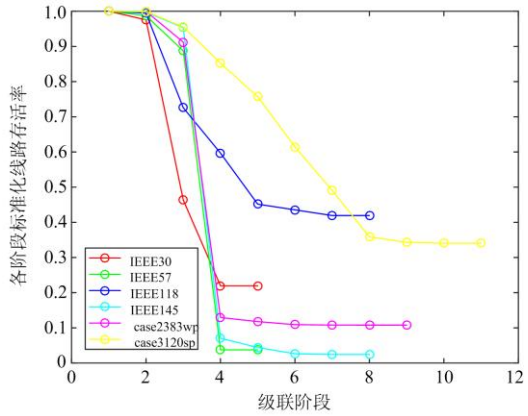
(c) 功率存活率变化情况

图 4 更改容量系数，鲁棒性评估指标在不同攻击策略下的变化情况

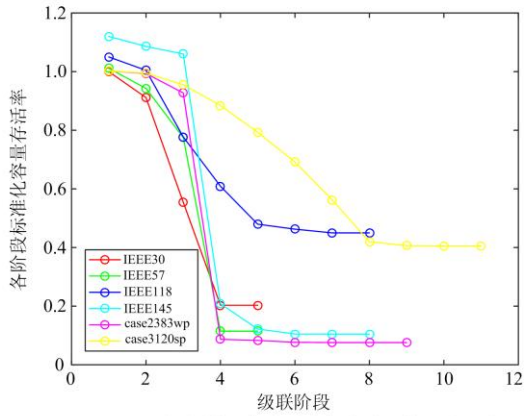
Fig. 4 Change of capacity coefficient and robustness evaluation index under different attack strategies

4.2 网络规模对鲁棒性的影响

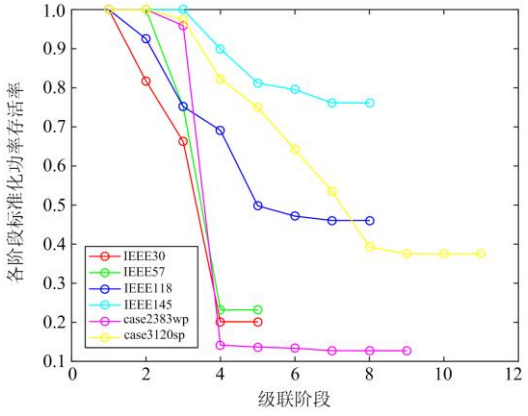
为评估网络规模变化对连锁故障结束后鲁棒性的影响，以 Matpower7.0 中 IEEE30、IEEE57、IEEE118、IEEE145、case2383wp 和 case3120sp 测试系统为例，以对连锁故障影响最深的电气出度中心性攻击策略对电网遭受攻击后的鲁棒性进行评估分析。如图 5 所示。



(a) 不同网络规模下连锁故障每个阶段线路存活率



(b) 不同网络规模下连锁故障每个阶段容量存活率



(c) 不同网络规模下连锁故障每个阶段功率存活率

图 5 给定容忍系数，不同网络规模下鲁棒性变化情况

Fig. 5 Given the tolerance coefficient, the robustness changes under different network scales

为直观反映网络规模变化对电网鲁棒性的影响程度，对不同攻击模式下的初始故障线路、级联深度、鲁棒性评估指标变化情况进行统计分析，如表 2 所示。

表 2 不同网络规模下连锁故障演化路径及其评估

Table 2 Evolution path and evaluation of cascading failures under different network scales

算例	初始故障线路	级联深度	线路存活率	容量存活率	功率存活率
IEEE30	[6,8]	5	0.219 5	0.203 1	0.201 3
IEEE57	[1,15]	5	0.037 5	0.114 7	0.231 9
IEEE118	[8,9]	8	0.419 4	0.449 9	0.460 4
IEEE145	[119,131]	8	0.024 3	0.104 6	0.761 3
case2383wp	[138,67]	9	0.107 7	0.075 7	0.127 2
case3120sp	[184,197]	11	0.340 6	0.405 2	0.375 2

综合图 5 中 6 个典型 IEEE 标准测试系统的鲁棒性评估结果和表 2，可得如下结论：在给定网络参数的情况下，IEEE30 和 IEEE57 测试系统级联深度均为 5，IEEE118 和 IEEE145 级联深度均为 8；case2383wp 级联深度为 9 而 case3210sp 级联深度为 11。表明相同数量级的网络规模具有相同的级联深度，且级联深度随网络规模的增加有提升的趋势。更深的级联深度给电网运行调度人员提供更多时间启动继电保护装置，表明网络规模的提高一定程度上可以增强电网鲁棒性。

5 结论

本文基于复杂网络理论和电力系统潮流特性，提出一种交流潮流连锁故障模型，基于所提模型改进复杂网络中重要性度量指标，并对连锁故障后电网鲁棒性进行评估分析，得如下结论：

1) 对于给定容忍系数的情况下，基于电气出度中心性的攻击模式对电网鲁棒性造成的影响最大；基于加权电网潮流转移熵的蓄意攻击模式级联深度最高；基于电气介数指标的攻击模式故障后对系统危害小于上述两种策略。

2) 随着容忍系数增大，鲁棒性评估指标并非线性增长，但就整体趋势而言，容忍系数的增大对鲁棒性的提升有很大帮助；且基于不同攻击模式下指标值变化趋势与给定容忍系数时相同。

3) 在给定网络参数的情况下，相同数量级的网络规模连锁故障后有相同的级联深度，且级联深度随网络规模的增加逐步提升。在对电网进行韧性提升方案选择时，要依据不同数量级的电网规模选择不同的韧性提升方案。

参考文献

[1] 于群, 王琪, 曹娜. 基于异质元胞自动机的互联电网连锁故障控制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 118-132.
YU Qun, WANG Qi, CAO Na. Control measures for cascading failures of interconnected power grids based on heterogeneous cellular automata[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 118-132.

[2] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-index comprehensive risk assessment of secondary system hidden faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.

[3] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8 9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis of the “8·9” blackout in the UK and its enlightenment to China's power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.

[4] Technical report on the events of 9 August 2019[EB/OL]. https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download.

[5] 韦晓广, 高仕斌, 李多, 等. 基于连锁故障网络图和不同攻击方式的输电线路脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 465-474, 677.
WEI Xiaoguang, GAO Shibin, LI Duo, et al. Transmission line vulnerability analysis based on cascading failure network diagram and different attack methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 465-474, 677.

[6] 金梦, 李修金, 刘一丹, 等. 基于 PSModel 的江苏电网机电-电磁混合仿真[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 7-11, 27.
JIN Meng, LI Xiujin, LIU Yidan, et al. PSModel-based electromechanical-electromagnetic hybrid simulation of Jiangsu power grid[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 7-11, 27.

[7] SUN Q, SHI L, NI Y, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.

[8] 张宇童, 汪樟垚, 雷怡菲, 等. 考虑自组织临界条件的区域电网风电极限渗透功率评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 9-15.
ZHANG Yutong, WANG Zhangyao, LEI Yifei, et al. Regional grid wind power limit penetration power evaluation method considering self-organized critical conditions[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 9-15.

[9] 李淑蓉, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地故障电弧建模及过电压分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 47-53.
LI Shurong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Arc modeling and overvoltage analysis innon-solidly earthed networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 47-53.

[10] 马瑞, 张海波, 王建雄, 等. 考虑负荷时变性的配电网故障抢修恢复策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 20-27.
MA Rui, ZHANG Haibo, WANG Jianxiong, et al. Research on fault rush repair and recovery strategy of distribution network considering time variation of load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 20-27.

[11] 曾祥君, 陈磊, 喻锟, 等. 基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 12-18.
ZENG Xiangjun, CHEN Lei, YU Kun, et al. A real time monitoring method for the single-line break fault based on dual-terminal information in the distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 12-18.

[12] 马喜平, 夏超浩, 徐宏雷, 等. 暂态干扰下并网光伏发电系统故障特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 90-96.
MA Xiping, XIA Chaohao, XU Honglei, et al. A study on fault characteristics of grid-connected photovoltaic power generation system under transient disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 90-96.

[13] LIU X, LI Z. Revealing the impact of multiple solutions in DCOPF on the risk assessment of line cascading failure in OPA model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4159-4160.

[14] WANG Z, SCAGLIONE A, THOMAS R J. A Markov-transition model for cascading failures in power grids[C] // Proceedings of 2012 45th Hawaii International Conference System Sciences, January 4-7, 2012, Hawaii, USA: 2115-2124.

[15] CHEN J, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.

[16] DONG H, CUI L. System reliability under cascading failure models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 929-940.

[17] 郭金鹏, 黄少伟, 梅生伟, 等. 基于序贯重要性采样的电力系统连锁故障负荷损失分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3132-3139.
GUO Jinpeng, HUANG Shaowei, MEI Shengwei, et al. Power system cascading failure load loss analysis method based on sequential importance sampling[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3132-3139.

[18] REZAEI P, HINES P D H, EPPSTEIN M J. Estimating cascading failure risk with random chemistry[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2726-2735.

[19] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Power grid cascading failure risk assessment model based on accident chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.

[20] 宣晓华, 周野, 宋晓芳, 等. 基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 101-109.
XUAN Xiaohua, ZHOU Ye, SONG Xiaofang, et al. Power system cascading fault chain identification method based on dynamic interactive quantitative analysis of system and components[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 101-109.

[21] 孙启明, 石立宝, 司大军, 等. 基于连锁故障事故链搜索的输电网风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 27-34.
SUN Qiming, SHI Libao, SI Dajun, et al. Research on transmission grid risk assessment based on cascading failure accident chain search[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 27-34.

[22] ZHANG X, ZHAN C, CHI K T. Modeling the dynamics of cascading failures in power systems[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2017, 7(2): 192-204.

[23] ZHAN C, CHI K T, SMALL M. A general stochastic model for studying time evolution of transition networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 464: 198-210.

[24] 金波, 肖先勇, 陈晶, 等. 考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 1-7.
JIN Bo, XIAO Xianyong, CHEN Jing, et al. Cascading failure risk assessment considering protection failure and power grid dynamic balance characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 1-7.

[25] 吴晨, 韩海腾, 祁万春, 等. 基于改进线路效能的电网脆弱性辨识方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 64-68.
WU Chen, HAN Haiteng, QI Wanchun, et al. Research on power grid vulnerability identification method based on improved line efficiency[J]. Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 64-68.

[26] FANG J, SU C, CHEN Z, et al. Power system structural vulnerability assessment based on an improved maximum flow approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 777-785.

[27] KOÇ Y, WARNIER M, KOOIJ R E, et al. A robustness metric for cascading failures by targeted attacks in power networks[C] // 2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), April 10-12, 2013, Evry, France: 48-53.

[28] LIU B, LI Z, CHEN X, et al. Recognition and vulnerability analysis of key nodes in power grid based on complex network centrality[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(3): 346-350.

[29] FAN W, ZHANG X, MEI S, et al. Vulnerable transmission line identification using ISH theory in power grids[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 1014-1020.

[30] LIU J, XIONG Q, SHI W, et al. Evaluating the importance of nodes in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 452: 209-219.

收稿日期：2020-12-04；　修回日期：2021-02-01

作者简介：

胡福年(1967—)，男，博士，教授，研究方向为电力系统鲁棒性、智能电网优化控制、多元配电网协调控制；E-mail: funian@jsnu.edu.cn

陈灵娟(1997—)，女，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统鲁棒性；E-mail: chenlingjuanchn@163.com

陈　军(1978—)，男，博士，副教授，研究方向为模糊、时滞和神经网络等系统的稳定性分析。E-mail: jchen2019@jsnu.edu.cn

(编辑　葛艳娜)