

# 基于复杂网络理论的电网脆弱性研究概述

刘丹

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要** 综述了当前复杂网络理论应用于电力系统脆弱性研究的现状。从基于复杂网络理论建立电力系统的拓扑模型和电网脆弱性评估指标两个方面分别进行分析概述,总结了现有研究方法的特点及不足之处。指出结合电气特性建立复杂电网改进拓扑模型以及建立综合性脆弱度评估模型在今后的研究重点。最后,对新环境下的复杂电网研究进行展望。

**关键词** 复杂网络; 电力系统; 拓扑模型; 脆弱性评估指标

电力系统朝着规模扩大化和元件复杂化迅速发展,但在电网运行性能提升的同时也带来了电网安全稳定程度下降的问题。近年来,在世界范围内发生多起由局部故障引发的大规模停电事故<sup>[1]</sup>,使得探究电网级联故障发生的决定性因素及提升电网安全运行问题备受关注。故障过程的复杂性、随机性及不可预测性凸显了现代电力系统脆弱的一面,一定程度上也暴露了现有控制方法及应对策略的不足或缺失。

电网的结构属性决定电网的运行状态,基于复杂网络理论研究电网的结构属性与连锁故障的关系成为近年来的研究热点。本文围绕基于复杂网络理论的电网脆弱性研究主要做出以下工作: a. 基于复杂网络的电网拓扑建模; b. 电网改进拓扑模型类比分析; c. 脆弱性评估指标分类总结; d. 总结与研究展望。

## 1 基于复杂网络的电网拓扑建模

复杂网络理论把现实中的网络抽象成节点集合  $V$  和边集合  $E$  的网络连接关系图  $G=(V,E)$ ,并提出一些描述网络结构的特征参数: 平均路径长度、节点度数、聚类系数、介数等。

1.1 平均路径长度  $L$ 。定义节点  $i$  到节点  $j$  之间的距离  $d_{ij}$  为连接两节点的最短路径上的边数,网络的平均路径长度为任意两个节点距离的平均值

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

其中  $n$  为网络节点个数,下同。

1.2 聚类系数  $C$ 。用来衡量网络节点凝聚程度。网络中单个节点的聚类系数为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

其中  $C_i$  为节点  $i$  的聚类系数。

$$C_i = \frac{2m_i}{n_i(n_i-1)} \quad (3)$$

式中  $n$  为网络节点数,  $d_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的最短路径长度,  $m_i$  为节点  $i$  所连节点之间的连边数目,  $n_i$  为节点  $i$  的度数。

1.3 节点度数。与节点连接的其他节点数目。

1.4 节点/线路介数。介数表示节点或线路被网络中所有最短路径通过的次数。

## 2 复杂电网的改进拓扑模型

早期建立实际电网的复杂网络模型为无向无权拓扑模型,考虑到实际电网与电气特性同样密切相关,简化的电网拓扑模型仅仅从拓扑结构的角度分析网络元件不够合理,不能较为准确识别电网的脆弱元件。基于上述问题,当前研究加强对拓扑模型权重的选择以及电网脆弱性的评估指标。其中,加权拓扑模型的建立本文将其分为以下3类。

### 2.1 以支路阻抗作为边权重

文献[2-3]将线路阻抗作为边权重,并以发电机有功输出为最短路径权重提出带权重线路介数,对承担功率不多但在结构中具有重要位置的线路具有一定的辨识效果。但是出于对电流方向的考虑,功

率只沿发电机节点到负荷节点对之间的最短路径传输,与实际功率分布情况有较大出入。文献[4]用节点间注入电流元的方法求得节点间等值导纳,拓扑模型具有电网功率传播可分性,文献[5-6]在此基础上考虑发电机容量和负荷水平,作为介数的计算权重,量化了“发电机-负荷”节点对之间各线路功率的占用情况,且电气介数的权重加入使潮流具有指向性。但是“发电机-负荷”节点对之间注入电流元后在所有线路上产生电流分量,与实际潮流分布仍不符。

2.2 以电网运行参数为元件权重,如发电机出力、潮流分布、元件可靠性等

文献[7-8]以节点的有功注入影响结合准稳态功率分布因子<sup>[7]</sup>建立加权模型,并以单位元件权重占整个网络权重的比例改进介数指标,体现线路承担有功功率的差异性。文献选取表征线路有功分布的权重,规避了最短路径的概念。文献[9]采用阻抗为边权重的建模方法。网络节点评估时,以节点在电网中功率分配作用和电网结构中的连接重要程度作为节点权重。其他文献,如文献[10]以元件运行可靠性为边权重,在结构脆弱性的基础上加入参数脆弱度的考察,用于辨识退出电网时间较长而严重影响电网正常运行的线路。

### 2.3 以混合测度为边权重

文献[11]提出的加权网络模型中,以线路阻抗与通过该线路的有功功率的乘积为权重,表征线路在系统有功功率传输中的贡献。文献[12]中支路权重为线路阻抗与线路电压因子倒数的乘积,并将电网分解为  $P$ (有功)和  $Q$ (无功)两个有向加权网络分别研究电网有功平衡和无功平衡特性。线路阻抗可以反映线路长度和材质,是线路传输能力的内在限制因素,有功传输或线路压降是线路动态运行效率的体现,即混合权重是元件静态结构和动态运行状态的综合考察。目前以混合测度为权重的电网拓扑建模方法仍不足,难点在于,对电气特性关键因素的提取,更关键在于多因素耦合关系表述的不准确。

## 3 复杂电网的脆弱性评估指标

电力系统脆弱性是指系统在正常运行或各种随机因素的扰动下,系统承受故障能力不断弱化的特性,及系统不能持续正常运行的可能趋势及其影响。复杂网络理论主要用于分析拓扑结构,而在拓扑结构中考虑电气特征使脆弱性的判别能更准确的应用于实际电网分析。本文对脆弱性评估模型大致从以下3个方面进行总结。

### 3.1 具有电气特性的网络特征参数评估方法

文献[13-14]等通过元件度数/介数及其累积概率分布判断出元件在电网结构中的重要性。但是,元件在拓扑结构中相对重要,而在实际电网中未必承担相同重要程度的贡献。一些研究提出改进介数指标等进行脆弱元件识别,如潮流介数、带权重介数等,继承了介数指标具有结构评价功能和计算高效的特点,同时又加入了电网运行状态相关因素的考量,因此指标的评价能力被大多数研究者青睐。

### 3.2 结构脆弱性指标

连通性指标<sup>[2-3]</sup>: 评估故障后网络结构解裂情况; 失负荷率指标: 评估故障后网络带负载能力; 全局效能指标、最大传输能力: 评估故障后网络的传输能力。

### 3.3 综合型评估指标

作者简介: 刘丹(1990,10-),女,吉林省德惠市,东北电力大学,研究生,电力系统网络安全及稳定性分析。

文献[10]基于介数的结构评价效果,加入元件运行可靠性的单元脆弱权重,建立元件脆弱性介数指标,并从负荷退出网络后带来的经济损失建立后评估脆弱度指标,然后以二者指标乘积得到综合脆弱度评估模型,用来识别脆弱单元。两个评估指标分别从影响网络运行的时间维度和经济效益维度来估计故障大小,不足的是评估指标中两个因素的乘积形式不能区别这两个因素的重要程度。文献[11]用传输路径的加权长度和与系统传输有功功率总量的比值来定义平均传输距离 $L_a$ ,以表征线路故障对网络全局的影响程度,并以故障后发电机节点的无功出力变化量 $D_q$ 和负荷节点的电压变化量 $D_a$ 来评估线路故障对网络局部无功平衡的影响,最后以 $L_a$ 、 $D_q$ 、 $D_a$ 三者归一化指标的加权和定义综合脆弱度指标。脆弱度评估指标从全局和局部、有功和无功两个方面综合考虑了线路在电气拓扑结构的重要程度、承受的负载、故障后对电网运行状态的影响。

不难看出,综合型脆弱度评估模型以其多元的考察角度和多理论结合的分析手段,使实验人员能更加准确用于电网分析。

#### 4 结论

基于复杂网络理论的电网脆弱性评估目前仍主要处于理论研究阶段,但尚不足以投入电网的实际分析应用。电力系统脆弱性评估今后的主要研究重点是:提升拓扑模型的评估能力,实现电气动态特性和静态结构脆弱度反映的合理量化。电网脆弱性分析的目的是为了对脆弱因素辨识进而加以保护,以提高电力系统鲁棒性,维持电网正常的运行状态,减少停电事故的发生。此外,复杂网络理论与其他科学理论的结合在电网复杂性问题中的研究应用正在得到进一步的关注,是研究的必然趋势所在。

#### 参考文献

- [1]刘迎迎,孙毅,李昕等.电力系统电网稳定分析方法综述[J].东北电力大学学报,2013,33(5):43-46.
- [2]LIU Yingying,SUN Yi,LI Xin,et al.Overview of power system stability analysis methods[J].Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2013,33(5):43-46.
- [3]Xu S Z,Zhou H,LI C X,et al.Vulnerability assessment of power grid based on complex network theory [C]//2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan,China,2009.
- [4]曹一家,陈晓刚,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5.
- [5]CAO Yijia,CHEN Xiaogang,SUN Ke.Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory [J].Electric Power Automation Equipment,2006, 26(12):1-5.
- [6]徐林,王秀丽,王锡凡.使用等值导纳进行电力系统小世界特性识别[J].中国电机工程学报,2009,29(19):20-26.
- [7]XU Lin,WANG Xiuli,WANG Xifan.Small-world feature identification based on equivalent admittance for power system [J].Proceedings of the CSEE,2009,29(19): 20-26.
- [8]徐林,王秀丽,王锡凡.电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(1): 33-39.
- [9]XU Llin,WANG Xiuli,WANG Xifan.Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system [J].Proceedings of CSEE, 2010,30(1): 33-29.
- [10]Kai Wang,Bu-han Zhang,Zhe Zhang,et al.An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load [J].Physica A, 2011,390: 4692-4701.
- [11]苏蕙玲,李扬.从电力系统复杂网络特征探讨元件的脆弱性[J].电力系统自动化,2012,36(23):12-17,77.
- [12]SU Huiling,LI Yang.Electrical component vulnerability analysis from complex network characteristics of power systems [J].Automation of Electric Power System,2012, 36(23): 12-17.
- [13]苏蕙玲,李扬.基于准稳态功率转移分布因子的电力系统复杂网络特性分析[J].电力自动化设备,2013,33(9): 47-53.
- [14]SU Huiling,LI Yang.Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system [J].Electric Power Automation Equipment,2013, 33(9): 47-53.
- [15]张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.
- [16]ZAHNG Guohua,ZHANG Jianhua,YANG Jingyan,et al.Vulnerability assessment of bulk power grid based on weighted directional graph and complex network theory [J].Electric Power Automation Equipment,2009, 29(4):21-26.
- [17][10]魏震波,刘俊勇,朱国俊,等.基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J].电工技术学报,2010,25(8): 131-137.
- [18]WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. Vulnerability Evaluation Model to Power Grid Based on Reliability-Parameter-Weighted Topological Model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8):131-137.
- [19][11]倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.
- [20]NI Xiangping,MEI Shengwei,ZHANG Xuemei. Transmission lines' vulnerability assessment based on complex network theory [J].Automation of Electric Power System,2008,32(4):1-5.
- [21][12]魏震波,刘俊勇,李俊,等.基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(24):19-29.
- [22]WEI Zhenbo,LIU Junyong,LI Jun,et al.Vulnerability analysis of electric power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition [J].Power System Protection and Control, 2010,38(24):19-29.
- [23][13]M. E. J. Newman. Communities,modules and large-scale structure in networks[J].Nature physics,2013,8(1):25-31.
- [24][14]许立雄,刘俊勇,刘洋,等.电力网络结构特性分析[J].四川大学学报,2014,46(2):133-139.
- [25]XU Lixiong,LIU Junyong,LIU Yang,et al.Analysis of power network structure[J].Journal of Sichuan University, 2014,46(2):133-139.