

关于网络故障脆弱性优化评估仿真

吕彩艳, 程若发, 杨宏超, 王雪微

(南昌航空大学 信息工程学院, 南昌 330063)

摘要: 网络故障脆弱性优化评估即分析故障模式下的电网脆弱性变化, 以降低故障影响及发生可能性, 但传统的脆弱性评估中忽略了线路权重以及输电效率的影响, 构造以线路电抗为权值的电网加权拓扑模型, 定义综合考虑节点和边差异性的网络结构熵下降百分比指标和考虑路径长度的输电效率下降百分比指标, 通过不同故障模式下的指标变化值, 分析电网的脆弱性, 最后对 IEEE9 节点系统进行仿真分析, 实验结果验证了所提方法的有效性和正确性, 且说明电网对关键节点的依赖大于普通节点, 合理安排电网结构将有效提高系统稳定性能。

关键词: 电力网络; 脆弱性; 连锁故障; 网络结构熵; 输电效率

Vulnerability Optimization Assessment Simulation of Power Grids Based on Failure Mode

Lü Caiyan, Cheng Ruofa, Yang Hongchao, Wang Xuewei

(College of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Vulnerability optimization assessment simulation of power grids based on failure mode is to analyze its vulnerability, and reduce the impact of network fault, the impedance based topological model and cascading failure model for weighted power grid were established. Considering both node and edge differences to evolution and define a new network structure entropy, and considering the pathlength to define transmission efficiency index. Then analyze vulnerability of power network via index values changes under different failure mode. Simulation results on the IEEE9 bus system show the effectiveness and accuracy of the suggested hybrid method, and indicated power grid relies much more on key nodes than common nodes, and arranging a reasonable structure will be more effective in increasing the reliability and stability of the power grid.

Keywords: power network; vulnerability; cascading failure; network structure entropy; transmission efficiency

0 引言

电力系统是一个由众多相互动态作用的组件构成的非线性复杂系统, 系统中任一元件发生故障, 都将对整个系统产生不同程度的影响。电力系统的脆性表明了电网的安全特性, 电网作为一个复杂系统, 其脆弱性问题更加不可忽视。国内外的电力系统发生过大规模的停电事故, 基本都是因为某个节点或几条线路退出运行而导致的系统故障。因此有研究表明, 电网的结构对系统故障起着关键作用。因此研究系统节点或线路退出运行造成的故障传播特性与电网的脆弱性关系, 对提高系统稳定性能, 降低故障风险则具有十分重要的意义。

目前已有较多的文献分析了电网的故障特性, 文献 [1-2] 对北美电网和意大利电网进行了故障仿真, 在其拓扑模型基础上研究了电网故障的连锁反应与电网自身结构的关系; 文献 [3-5] 分析了具有小世界特性模型的电网与结构脆性之间的关系; 文献 [4-5] 根据小世界网络的特性, 分析了不同节点度数以及负荷分布对电网的影响, 证实了电网对关键节点的

依赖性。但是上述文献并未加入线路权重, 未考虑线路电抗值给电网带来的影响。文献 [6] 从电网的网络结构熵出发, 研究了结构熵与网络损失负荷百分比与时间的关系, 分析了故障发生后的网络特性, 未考虑输电效率的影响; 文献 [7] 从电网的故障模式出发, 模拟正常天气和恶劣天气情况下的系统连通率的变化, 其脆弱性指标仅为连通性水平, 未考虑系统线路权重以及输电能力; 文献 [8-10] 从电力系统脆弱性角度分析了电力系统的安全性能, 并未考虑故障发生的可能性。

基于上述思想, 本文建立加权网络拓扑模型, 定义网络结构熵下降百分比指标和输电效率下降百分比指标, 通过模拟不同故障模式下的指标变化值, 分析电网的脆弱性, 最后通过对 IEEE9 节点系统的仿真实验说明了脆性指标以及故障模拟分析的合理性, 且电网对关键节点的依赖大于普通节点, 合理有效的电网结构有利于提高系统安全稳定性能。

1 网络故障脆弱性评估模型

1.1 故障评估指标要求

电网的故障可以理解为当系统中某一元件或线路退出运行进而导致系统中其他部分崩溃的行为。因此如何正确评估系统的故障及其脆弱性是保证电网安全稳定运行的关键。

基于电网自身的复杂性以及电网结构的重要性, 合理准确的分析电网结构则尤为重要, 因此在评估中加入电抗值作为线路权重, 分析输电路径长度的变化, 从而使电网分析更加贴合实际。另外, 当电网处于故障模式下, 其网络更加脆弱, 最终导致系统崩溃的可能性则越大, 因此本文建立几种故障模式,

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-10-18。

基金项目: 国家基金项目 (51567019, 51167013); 省教育厅项目 (GJJ11165)。

作者简介: 吕彩艳 (1992-), 女, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事微电网优化方向的研究。

程若发 (1971-), 男, 安徽六安人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事微电网建模与仿真方向的研究。

从而更好的分析网络在故障模式下的脆弱性，更好的评估系统的脆弱性。

1.2 故障脆弱性评估模型

为分析电网本身的拓扑结构与脆弱性关系，建立完整的电网拓扑模型是以一个稀疏的连通图来表示电网的拓扑结构，图中的节点为实际电网中的发电机、负荷、变电站，边代表实际电网中的变压器支路、高压线路，无权网络模型中的线路边的权值都为 1，而加权拓扑模型边的权值为线路的电抗值。通过遍历电网中的所有信息，并对节点和边进行编号，可以得到实际电网对应的拓扑电网图。

电网的拓扑模型特性中包括网络平均度数，聚类系数，介数，最短路径等网络参数，并定义经过节点的最短输电路径的条数，即为节点的介数，即为结构负荷，基于网络拓扑模型的结构负荷虽然不能完全和实际电网中的负荷分布保持一致，但在一定程度上反映了潮流在电网中的分布情况，因此结构负荷的分布特性具有实际的参考价值。平均路径长度和节点度分布表达式如下：

1) 平均路径长度 L 。

平均路径长度是指所有节点对之间距离的平均值，而两个节点之间的距离 d_{ij} 即输电路径长度定义为连接它们之间最短路径所包含的边数。所以平均路径长度 L 为：

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

式中， n 表示网络节点数。

2) 节点度分布。

节点的度定义为连接某个节点的所有边的数目，度分布概率即为任一节点的度数为 k 的概率。通过度的分布情况，可以分析电网系统节点的重要程度。

2 故障脆弱性评估方法

基于上述构建的电网拓扑分析模型，并通过两种故障模式对电网进行故障模拟，研究其脆弱性指标变化情况。

2.1 脆弱性指标

1) 网络结构熵下降百分比。

本文中线路的权值用电抗值来表示，从而在系统模型中加入了电气元件参数，使得网络运行更加贴近实际。结合节点和线路，综合考虑其差异性，并定义加权的网络结构熵概念，并通过其下降百分比，构造网络结构熵下降百分比指标，进而分析其结构脆弱性变化。

节点差异性体现在节点重要度之间的区别，用节点度的分布情况来描述，可得节点差异性如下：

$$D_i = (1 - P(k_i)) * N \quad (2)$$

其中， $P(k_i)$ 表示节点度数为 k_i 的概率， k_i 表示节点度， N 为节点数目。

因为节点度数为 k_i ，所以当选择一条线路时，节点被选中连接的概率应为 k_i 倍，综合考虑节点与线路的关联性，线路的权重则用节点领域内的电抗值 $\sum W_{ij}$ 来表示，因此定义线路差异性为：

$$L_i = k_i * D_i * \sum W_{ij} \quad (3)$$

归纳上述节点和线路差异性，确定中间量 B_i 和节点重要度如下：

$$B_i = (D_i + L_i) / 2 \quad (4)$$

$$I_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i} = \frac{(k_i * \sum W_{ij} + 1) * (1 - P(k_i))}{\sum_{i=1}^N (k_i * \sum W_{ij} + 1) * (1 - P(k_i))} \quad (5)$$

因此，网络结构熵^[6]定义为：

$$E(i) = - \sum_{i=1}^N I_i(t) \log I_i(t) \quad (6)$$

N 为节点数目，定义网络结构熵下降百分比为：

$$L = \frac{E_0 - E_i}{E_0} * 100\% \quad (7)$$

式中， E_0 为初始网络的网络结构熵， E_i 为新网络结构下的网络结构熵值，

2) 输电效率下降百分比。

当电网结构遭到破坏，初始网络的某些节点或者线路将会被切除，进而影响电网的电能传输，当故障影响范围越大，被切除的节点和线路则越多，因此输电路径长度也增加，因为某些输电路径被中断，长度变为无穷大，因此定义输电路径长度的倒数和为电网的输电效率，并用输电效率下降百分比来衡量故障的影响程度，其公式为：

$$H = \frac{D_0 - D_i}{D_0} * 100\% \quad (8)$$

式中， D_0 为初始网络的所有输电路径长度的倒数和， D_i 为新网络结构下的所有输电路径长度的倒数和。

2.2 故障模式

为更好的分析故障模式下的电网脆弱性变化，并且确定电网中的薄弱节点以及对电网稳定性影响最大的因素，建立不同方式的扰动模型，扰动一般通过移除节点来实现，节点的移除代表着与之相连接的所有线路的移除。一般的攻击模式分为随机攻击和蓄意攻击，本文设计了两种故障攻击模式：

模式 1 每次只攻击一个节点，以随机攻击和度数为基础，具体分为两种方案，(1) 随机攻击某个节点，并且每次只攻击单个节点；(2) 蓄意攻击度数最大的节点，并且依次攻击度数次大的节点。

模式 2 进行连锁攻击，即每次一个节点攻击之后，继续攻击下一个节点，同样分为两种方案，(1) 随机攻击某个节点，并且逐次增加攻击节点的个数；(2) 蓄意攻击度数最大的节点，并且进行连锁攻击，即每次攻击 1 个节点之后，进而继续攻击剩下节点中度数最大的节点。

2.3 评估仿真内容

根据上文 3.1 节所述的网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比两个脆弱性指标可以求得网络系统的整体脆弱性情况，另外，根据 3.2 节所述的故障模式，可以仿真得出网络在不同故障模式下的脆弱性指标值，根据仿真得出的不同结果值可以对网络系统进行脆弱性的分析，从而可以得出不同的故障节点对系统不同程度的影响，以及判断网络在何种攻击情况下更加脆弱甚至最终导致系统的崩溃，在此结果之上，可以对电力系统进行必要的故障维护，确保电力系统安全稳定运行。

3 算例分析

本文通过 IEEE9 节点系统的标准电力系统数据，建立了电网的拓扑模型，进而分析电网在不同故障模式下的网络结构熵和输电效率的下降百分比指标变化情况。其 IEEE9 节点系统的网络结构图如图 1 所示，具体网络参数可参考其他文献和资料。

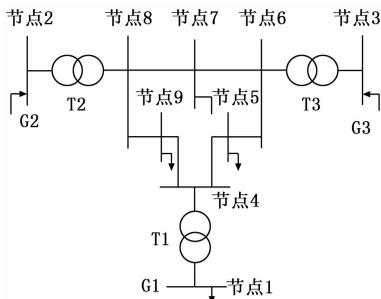


图 1 IEEE9 节点系统结构图

根据网络结构的度数以及以上各式可以求得网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比, 根据模式 1 方案下, 可以求得网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比的曲线变化图如图 2 所示, 横坐标为攻击次数, 纵坐标为式 (7) (8) 所示的网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比。

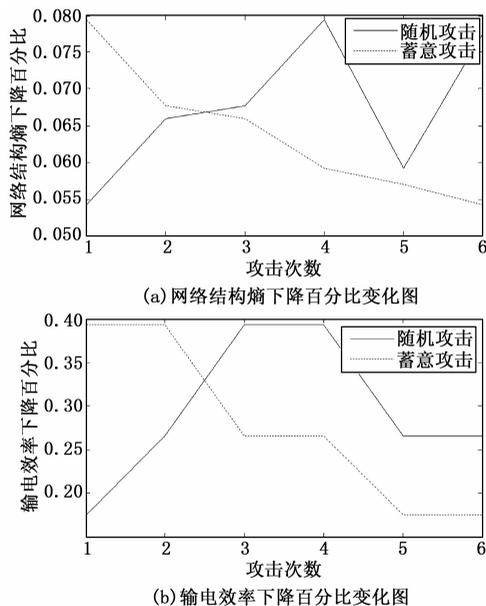


图 2 脆弱性指标变化图 (模式 1)

从图 2 可以看出, 在模式 1 的攻击情况下, 网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比都有一定量的增加, 即当网络受到攻击后, 其脆弱性增加, 系统变得更加不稳定, 说明对于特定的网络, 结构脆弱性是其本身的固有属性, 外界的影响因素无法改变其属性, 也说明了故障发生的必然性。另外, 从图 2 可以看出, 网络受到攻击都有不同程度的影响, 且当蓄意攻击度数最大的节点时, 网络结构熵下降百分比和输电效率下降百分比都为最大, 此时的脆弱性值为最大, 当攻击度数次大的节点时, 脆弱性程度相对低一些, 说明了电网的脆弱性研究中, 关键节点起着最为重要的作用, 而随机攻击各个节点时, 其脆弱性指标变化则没有明显的规律性, 但受到攻击都有不同程度的影响, 说明了故障的发生势必增加了电网脆弱性, 降低了电力网络的稳定性。

图 3 为故障模式 2 下的脆弱性指标变化图, 横坐标为故障节点数, 纵坐标为网络结构熵下降百分比指标和输电效率下降百分比指标。从图 3 可以看出, 不管是随机攻击还是蓄意攻击, 随着故障节点数的增加, 网络结构熵下降百分比和输电效率

率下降百分比也随之增加, 且最终达到最高点, 即系统彻底崩溃, 且由图 3 (a) 可知, 当蓄意攻击度数最大的节点时, 其网络结构熵下降百分比明显高于随机攻击所对应的值, 由图 3 (b) 可知, 在蓄意攻击下, 输电效率下降百分比发生阶跃变化, 增加到较大值, 这些结果说明了故障影响范围越大, 系统脆弱性就越大, 并最终导致系统的彻底崩溃, 另外关键节点一旦发生故障, 电网的脆弱性也会因为这些节点的故障而迅速增大, 因其为电网的重要环节, 决定着故障传播的程度, 而关键节点的故障所带来的连锁反应则更容易最终导致系统的彻底崩溃。

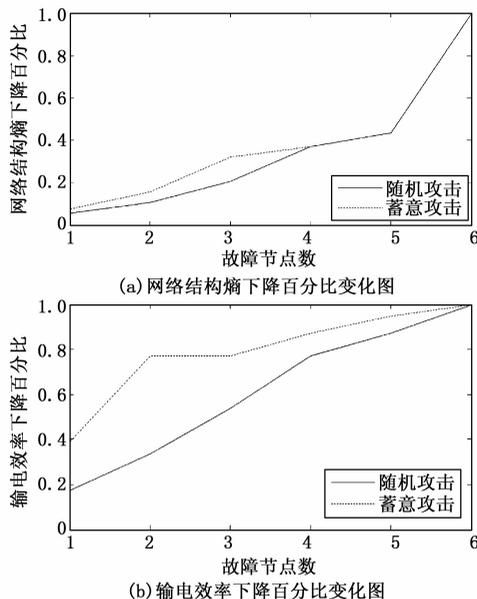


图 3 脆弱性指标变化图 (模式 2)

因此, 电网中关键节点的故障对电网的脆弱性影响远远大于随机节点故障所带来的影响, 另外, 随着故障节点的增多, 系统将变得越脆弱, 并最终导致系统的彻底崩溃。

综上所述, 为降低电网系统脆弱性以及故障风险, 提高电网系统的稳定性和可靠性, 必须加强与电网结构紧密联系的关键节点的防护与保障, 避免关键节点的故障对电网系统的影响, 尽量减少因为这些节点的故障而导致电网的连锁故障, 防止故障的发生以及故障的传播所带来的不良反应, 减少故障发生的概率, 并降低系统的脆弱性, 提高电网安全稳定性能。

4 总结

本文在研究电网脆弱性的基础之上, 建立考虑节点重要度和线路电抗值的网络结构熵以及考虑输电路径长度的输电效率指标, 并通过两个指标的下降百分比评估电网系统受到故障攻击之后的脆弱性, 通过对 IEEE9 节点系统的仿真实验证明了指标的合理性及可行性。另外, 通过不同的模式模拟了故障对电网的影响, 分析了故障在电网中传播带来的连锁反应, 实验结果表明, 关键节点的故障对电网的脆弱性有较大的影响, 且随着故障节点的增多, 即故障节点引起的连锁故障范围越大, 系统脆弱性将越大, 并最终导致系统的崩溃。因此, 在今后的电网建设中, 应注重对电网系统关键节点的防护与保障, 防止关键节点故障带来的连锁反应, 另外电网的结构脆弱性是其本