

电网脆弱性分析的一种新方法

徐政勋¹, 张伟民²

(1. 河南许昌许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 云南电网公司电力教育中心, 云南 昆明 650204)

摘要: 基于图论无尺度图的分析方法, 提出了一种电网脆弱性分析的新方法, 对复杂网络的脆弱性进行评估。构建了无尺度图的解析模型, 把系统的所有状态变量处理成有向图中的节点, 并给出了相关参数的定义及计算方法, 弥补了电网脆弱性分析只考虑网络结构, 没有结合状态参数的不足, 因此能更好地揭示电网的脆弱环节。通过对 IEEE57 节点系统计算分析, 验证了该方法的合理性与有效性, 为电力系统的规划设计及安全运行维护提供保证。

关键词: 电网脆弱性; 网络拓扑; 图论; 无尺度图

A new method of power system vulnerability analysis

XU Zheng-xun¹, ZHANG Wei-min²

(1. Xuji Transformer Co., Ltd, Xuchang 461000, China;

2. Power Education Center of Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650204, China)

Abstract: A new method of power system vulnerability analysis is proposed, which is based on the scale-free graph of graph theory to evaluate the vulnerability of complex network. A new analytical model of scale-free graph is constructed, all the state variables of the system is treated as a node in a directed graph, and the definition of the relevant parameters and calculation methods are given, to make up for the the deficiency of power grid vulnerability analysis that considers only the network structure and not combines state parameters, thus the grid vulnerabilities can be revealed better. IEEE57 node system is analyzed and calculated, research shows that the proposed method is correct and effective, ensuring the power system planning and design and the safe operating and maintenance.

Key words: vulnerability analysis; network topology; graph theory; scale-free graph

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0087-04

0 引言

电网是一套完整的复杂设备系统, 在恶劣的天气条件或过载等不正常运行状态情况下, 都可能使电力系统内的一个或多个部件(如发电机、变压器或输电线路等)受到干扰或发生事故, 并导致连锁故障, 最终影响网络安全运行, 这就是所谓电力系统的脆弱性^[1-2]。

目前, 电网脆弱性分析主要使用基于流的物理模型研究^[3-7], 通过建模识别系统内最关键的部件(例如输电线路、发电机、变压器等)可能会受到一些无法预见的扰动或影响, 通过计算依次测量削弱电力系统的单个组件故障。或通过电力系统复杂动态定性解释的基础上, 估计连锁故障事件发生的

概率^[8-10]。文献[11]提出了基于功率流模型的电网结构脆弱性的分析方法, 主要通过牛顿迭代算法, 但是该方法的速度较慢, 尤其当一个关键的功率流需要计算时, 还无法满足需要。文献[12]将人工神经网络法应用于电网的脆弱性评估。文献[13]提出了基于相似的复杂网络的电力基础设施系统功率的脆弱性评估。文献[14]提出了在强外力干扰下的电力系统脆弱性评估方法和脆弱性评价指标。文献[15]提出了基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估方法。但是这些方法无法满足较高精度的要求。

本文基于图论, 提出了无尺度图模型的脆弱性分析方法, 把系统的所有状态变量处理成有向图中的节点, 给出了相关参数的定义及计算方法, 应用于复杂网络电网脆弱性的分析。通过 IEEE 57 节点网络进行测试分析, 验证了模型的有效性及其合理性。

基金项目: 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目
(20130206083SF)

1 网络的拓扑结构

在图论中, 复杂网络可用无向图 $G=(V,E)$ 来表示, 其中 $V(G)=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为非空的顶点集, $E(G)=\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ 为边集。用 a_{ij} 表示顶点 v_i 与顶点 v_j 之间的边数, 可能取值为 0, 1, 2; 称所得矩阵 $A(G)=(a_{ij})_{n \times n}$ 为图 G 的邻接矩阵。一条边关联于两个顶点 i, j ; 用 m_{ij} 表示顶点 v_i 与边 e_j 关联的次数, 可能取值为 0, 1, 2; 称所得矩阵 $M(G)=(m_{ij})_{n \times k}$ 为图 G 的关联矩阵。若一条边与两个顶点关联则记为 $m_{ij}=1$, 否则记为 $m_{ij}=0$ 。与顶点 i 相关联的边数 (每次环计算两次), 称为顶点 i 的度, 记为 $d_G(i)$ 。

2 无尺度图的参数指标

所谓无尺度图是一种特殊的图, 其中存在众多的节点, 但只有少数几个集散节点有很大的度, 其余节点的度都小得多。图的宏观性质由这些集散节点决定, 一般与电力系统中的某一母线相联的支路条数并不多, 因此描述电力系统结构的节点导纳矩阵都是稀疏矩阵, 网络的规模越大, 节点导纳矩阵的稀疏性越强。若把系统的所有状态变量处理成有向图中的节点, 把这种关系用有向图的边描述, 则最终形成的有向图就是无尺度图。

当电网受到外部干扰或不合理操作时, 运用无尺度图的概念分析复杂网络的连锁故障, 会涉及到连通度和相关度等参数的运算。也就是通过逐次迭代消除有代表性的节点, 不断改变网络的拓扑结构, 每一个节点的消除, 也意味着所有与它相连接边的消失。

可以用测地距离来描述网络的紧凑性, 在微分几何中对测地线的定义为: “曲面上测地曲率恒等于零的曲线”, 也就是说测地线是物体表面两点之间的最短路径, 其长度称为测地距离。

可以运用 *Dijkstra* 算法求一对节点 i 和 j 之间的最短距离 l_{ij} : 设起点为 u_0 , 终点为 v_0 , 按距离 u_0 由近及远为顺序, 依次求得 u_0 到 G 的各顶点的最短路和距离, 直至 v_0 (或直至 G) 的所有顶点, 算法结束。其 *Matlab* 实现算法的主要步骤如下:

1) 令 $l(u_0)=0$, 对于 $v \neq u_0$, 令 $l(v)=\infty$, $s_0=\{u_0\}$, $i=0$ 。

2) 对每个 $v \in \bar{s}_i$ ($\bar{s}_i = V \setminus s_i$), 用 $\min_{u \in s_i} \{l(v), l(u) + w(uv)\}$ 代替 $l(v)$, 当 u, v 不相邻时, $w(uv)=\infty$ 。计算 $\min_{u \in s_i} \{l(v)\}$, 把达到这个最小值的一个顶点记为 u_{i+1} , 令 $s_{i+1} = s_i \cup \{u_{i+1}\}$ 。

3) 如果 $i = |V| - 1$, 则停止; 如果 $i < |V| - 1$, 则用 $i+1$ 代替 i , 转至步骤 2)。

算法结束时, 从 v_0 到各顶点 v 的距离由 v 的最后一次标号 $l(v)$ 给出。在 v 进入 s_i 之前的标号 $l(v)$ 叫 T 标号, v 进入 s_i 时的标号叫 P 标号。算法就是不断修改各个点的 T 标号, 直至获得 P 标号。

图的平均距离 \bar{l} 的计算方法由式 (1) 求得。

$$\bar{l} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} l_{ij} \quad (1)$$

节点 i 和 j 之间对应边 b_{ij} 的效果可以等效成测地距离的倒数。如果两个节点之间没有任何的联系, 则取 $b_{ij}=0$ 。

根据公式 (1) 可以定义测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$, 并用其来描述电网在某一节点发生故障时的相关度。

$$\bar{\beta} = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} \frac{1}{l_{ij}(\text{GH})}}{\sum_{i \neq j} \frac{1}{l_{ij}(\text{GQ})}} \quad (2)$$

式中: $l_{ij}(\text{GH})$ 为无尺度图中发生节点故障后, 一对节点之间的最短测地距离; $l_{ij}(\text{GQ})$ 为无尺度图中在电网处于稳态时, 一对节点之间的最短测地距离。测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 的取值在 0 和 1 之间, 且随着 $\bar{\beta}$ 数值的增大, 电网的连锁故障也随之增加。

在无尺度图中, 测定保持连通的节点数目后, 当消除一个节点, 其网络的连通度 γ 可由式 (3) 进行计算。

$$\gamma = 1 - \frac{n_{\text{GH}}}{n} \quad (3)$$

式中: n_{GH} 为在无尺度图中消除一个节点后, 连通的节点数量; n 为稳态时无尺度图中的节点总数。

2.1 连通度指标

为了确定电网中连锁故障的影响范围, 有必要定义连通度指标。网络的连通度指标是按照电网中剩余负荷进行计算, 连锁故障减负荷后, 总功率可由式 (4) 进行计算。

$$S_{\text{(amt)}} = 1 - \frac{\sum_i \sqrt{(P_{\text{Di}(\text{GH})})^2 + (Q_{\text{Di}(\text{GH})})^2}}{\sum_i \sqrt{(P_{\text{Di}(\text{GQ})})^2 + (Q_{\text{Di}(\text{GQ})})^2}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{Di}(\text{GH})}$ 为消除一个节点后, 剩余负荷消耗的有功功率; $Q_{\text{Di}(\text{GH})}$ 为消除一个节点后, 剩余负荷消耗的无功功率; $P_{\text{Di}(\text{GQ})}$ 为稳态时负荷消耗的有功功

率; $Q_{Di(GQ)}$ 为稳态时负荷消耗的无功功率; $S_{(amt)}$ 的取值在0和1之间, 且随着 $S_{(amt)}$ 数值的增大, 电网的总功率也随之增加。

2.2 相关度指标

虽然运用图论的方法不足以确定发电机和负载之间的功率传输能力, 但是可以通过相关系数的定义, 来确定总功率与网络的连通度 γ 及测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 之间的关系。相关系数的计算公式如式(5)、式(6)所示。

$$\rho_{(S, \gamma)} = \frac{\text{cov}(PS_{(amt)}, \gamma)}{\sqrt{D(PS_{(amt)})D(\gamma)}} \quad (5)$$

$$\rho_{(S, \bar{\beta})} = \frac{\text{cov}(PS_{(amt)}, \bar{\beta})}{\sqrt{D(PS_{(amt)})D(\bar{\beta})}} \quad (6)$$

式中: $\rho_{(S, \gamma)}$ 为总有功功率 $PS_{(amt)}$ 与连通度 γ 之间的相关度; $\rho_{(S, \bar{\beta})}$ 为总有功功率 $PS_{(amt)}$ 与测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 之间的相关度。

3 算例分析

依据上述的分析方法, 对 IEEE57 节点系统进行分析, 模拟计算蓄意攻击和随机攻击两种策略, 仿真结果如表 1、图 1 所示。

表 1 IEEE57 节点系统相关系数

Table 1 Correlation coefficient of IEEE57 nodes system

故障模式	相关系数	IEEE57
随机攻击	$\rho_{(S, \gamma)}$	0.714 8
	$\rho_{(S, \bar{\beta})}$	0.989 6
蓄意攻击	$\rho_{(S, \gamma)}$	0.626 4
	$\rho_{(S, \bar{\beta})}$	0.789 8

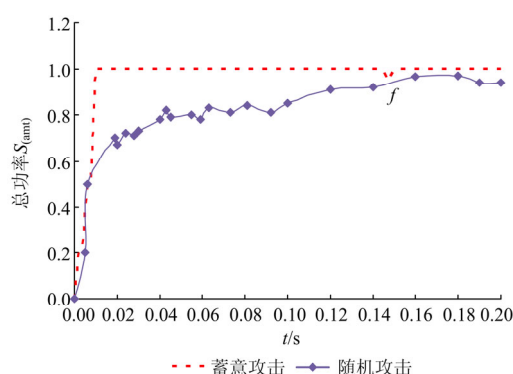


图 1 两种策略攻击后网络的分析

Fig. 1 Analysis of two strategies attacking on IEEE57 nodes system

数据分析如下: 随机故障节点被删除后, 相关系数 $\rho_{(S, \gamma)}$ 很低, 这意味着, 它不应该被视为评估电网脆弱性的一个精确指标。

相关系数 $\rho_{(S, \bar{\beta})}$ 趋近于 1, 这意味着总功率 $S_{(amt)}$ 与测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 之间呈线性关系, 故在连锁故障中, 可以利用测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 来确定断开的有功负荷。

$\rho_{(S, \bar{\beta})}$ 与 $\bar{\beta}$ 的相关性, 比 $\rho_{(S, \gamma)}$ 与 γ 的相关性弱, 故在不同的电网结构中, 可以运用平均测地脆弱性系数 $\bar{\beta}$ 来比选功率, 进而确定网络的脆弱性。并且可以看出: $\rho_{(S, \bar{\beta})}$ 的相关性大于 $\rho_{(S, \gamma)}$ 的相关性。分析的结果表明: 被消除的节点 f 最脆弱。

4 结论

本文基于图论提出了无尺度图模型的一种电网脆弱性分析方法, 且该方法不需要使用其他电参量来评估网络脆弱性。算例分析的结果证明: 该方法能够迅速找到脆弱点, 节约了运算时间, 有望于在线应用。

参考文献

- [1] DWIVEDI A, YU Xing-huo, SOKOLOWSKI P. Analyzing power network vulnerability with maximum flow based centrality approach[C] // Proc 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2010.
- [2] 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.
ZHANG Liang-dong, SHI Hui, ZHANG Yong-jun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 30-133.
- [3] 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.
YANG Ming-yu, TIAN Hao, YAO Wan-ye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 1-5.
- [4] CHEN X G, SUN K, CAO Y J, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[C] // Power Engineering Society General Meeting, Florida, USA, June, 2007.

- [5] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406: 378-382.
- [6] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(23): 89-93.
- LIU Yao-nian, ZHU Xi, KANG Ke-fei, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(23): 89-93.
- [7] Lü Zong-xiang, MENG Zhong-wei, ZHOU Shuang-xi. Cascading failure analysis of bulk power system using small-world network model[C] // *Proc 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Iowa State University, Ames, Iowa, 2004: 635-640.
- [8] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. A topological analysis of the Italian electric power grid[J]. *Physical A*, 2004, 338: 92-97.
- [9] DWIVEDI A, YU Xing-huo, SOKOLOWSKI P. Identifying vulnerable lines in power network using complex network theory[J]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009: 8-23.
- [10] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2): 1-4.
- [11] UBEDA J R, ALLAN R N. Sequential simulation applied to composite system reliability evaluation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1994, 9(1): 81-86.
- [12] YU Xing-bin, SINGH C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(4): 1818-1820.
- [13] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. A topological analysis of the Italian electric power grid[J]. *Physica A*, 2004, 338(1): 92-97.
- [14] SINGH C, PATTON A D. Protection system reliability modeling: unreadiness probability and mean duration of undetected faults[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1980, 29: 339-340.
- [15] BHAVARAJU M P, BILLINTON R, REPPEN N D. Requirements for composite system reliability evaluation models[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1988, 3(1): 149-157.

收稿日期: 2013-12-12

作者简介:

徐政勋 (1970-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电系统自动化;

张伟民 (1979-), 男, 主要研究方向为电力市场、电力系统自动化。E-mail: zzwwmm7788@163.com