

采用有向电气介数的脆弱线路选取

程临燕¹, 张保会¹, 李光辉¹, 王进¹, 郝治国¹, 薄志谦²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 英国阿海珐输配电自动化公司, ST17 4LX, 英国斯塔福特市)

摘要: 针对电力网络是有向加权网络的特性,在当前运行方式下考虑网络结构的脆弱性,利用线路功率组成,提出了将有向电气介数作为线路脆弱性指标.这样可以真实反映出“发电-负荷”节点之间功率传输对各线路的占用情况,并且引入发电机出力来考虑不同电压等级线路阻抗的差异,能有效识别出系统的关键线路,同时将传统的只考虑发电机负荷间最短路径的全局效能指标替换为考虑发电机负荷间所有传输路径的有向全局导纳指标,这样物理背景更符合电力系统实际.采用IEEE-39节点系统进行仿真计算,结果验证了该算法的有效性和可行性.

关键词: 有向电气介数;有向全局导纳;脆弱线路

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)06-0091-06

Search for Vulnerable Line Based on Directed Electric Betweenness

CHENG Linyan¹, ZHANG Baohui¹, LI Guanghui¹, WANG Jin¹, HAO Zhiguo¹, BO Zhiqian²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. AREVA Transmission & Distribution Automation, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: Power grid was considered as a directed weighted network to identify the vulnerability of the network structure with the given operating modes. The directed electric betweenness was presented to identify vulnerable lines according to their power components, which can more practically make quantification of the used-ratio of each line by each plant-load pair in power system, while the differences of line-impedance under different voltage-levels were also considered by introducing the generator output coefficient. All the transmission paths between generators and loads were considered in the introduced directed global admittance instead of only the shortest path, thus the physical background of the presented model is more reasonable in power system. And the validity of the proposed algorithm is verified by the calculation result of IEEE-39 bus test system.

Keywords: directed electric betweenness; directed global admittance; vulnerable line

近年来,电力系统大停电得到了越来越密切的关注^[1-2].统计数据表明,大停电事故一般由个别元件故障开始,并最终导致全系统崩溃^[3-4],其中极少数线路往往起到推波助澜的作用^[5-6].因此,如何寻找这些关键性线路,或称“脆弱线路”^[6],具有重要的理论和应用研究价值.

遭遇攻击时的脆弱性是复杂网络研究的一个热

点分支,其基本定义是从网络中有选择地移去某个节点或某条线路,以网络性能因此下降的程度衡量此节点或线路的脆弱度^[7].其研究目的在于识别出对系统功能影响严重的故障,从而采取正确的预防/校正措施实施保护.

目前,主要的脆弱性指标及系统评价指标都是基于功率沿着发电机、负荷间最短路径传输假设,包

括线路的介数、平均路径长度、输电效率等. 文献[5]从电网拓扑结构出发, 分析电网整体结构对连锁崩溃的影响, 指出介数和度数较高的联络节点在保证电网连通性的同时, 对故障的传播起着推波助澜的作用. 文献[6]将线路的权重定义为线路的电抗, 提出了使用带权重线路介数作为脆弱线路指标的辨识方法. 文献[8]指出电力网络的脆弱性与其网络拓扑有着密切关系, 并且介数指标比度数指标更能揭示系统的脆弱环节. 文献[9-11]定义了类似的节点介数, 并验证了高介数节点对系统的连锁故障也起着至关重要的作用.

在实际电力网络中, 功率的传播需要满足基尔霍夫定律, 并非受制于节点间的最短路径. 基于最短路径传输这种假设的物理背景与电力系统实际不符, 同时仅仅衡量故障对节点间最短路径长度的影响, 难以反映故障的严重性. 文献[12]以一简单系统为例说明, 一条支路断开前后系统平均路径长度和有效效能都没有任何变化, 故按已有模型系统应未发生任何变化. 但是, 直观上该支路断开会使系统由环网变为辐射网, 结构变化很大, 因此需要对已有模型结合电力系统实际加以改进.

文献[13]提出了将电气介数作为线路脆弱性指标, 将电力网络看作是一个无向加权网络, 仅仅基于基尔霍夫定律计算发电与负荷节点对线路的利用情况, 考察的是网络结构本身的脆弱性, 不足的是没有考虑系统当前运行方式和电力网络中的潮流具有方向性的特点.

为了弥补已有加权介数模型假设潮流只沿母线间最短路径传播和电气介数忽略电网潮流的方向性的不足, 正确对系统进行脆弱性评估, 本文结合系统当前运行方式, 基于线路功率组成, 提出了将有向电气介数作为线路脆弱性指标, 将电力网络作为有向加权网络考虑, 真实地反映出发电与负荷节点对之间的功率传输对各线路的占用情况, 并且引入发电机出力来考虑不同电压等级线路阻抗的差异, 能有效识别出系统的关键线路. 同时, 将传统的只考虑发电机与负荷间最短路径的全局效能指标替换为考虑发电机负荷间所有传输路径的有向全局导纳指标, 这样物理背景更符合电力系统实际.

1 有向电气介数和有向全局导纳

1.1 有向电气介数

(1)已有介数指标的缺点. 现有模型多从介数角度分析系统关键性元件, 并得出系统在针对高介数

节点或支路攻击下会变得很脆弱的结论. 所谓介数, 又称节点或支路的负荷, 是指某一节点或支路被网络所有的节点对之间的最短路径经过的次数.

文献[13]做出了一些改进, 指出功率不仅仅沿着发电机与负荷间最短路径传输. 根据电力系统潮流传播的特点并结合已有模型的基本思想, 可定义线路 (p, q) 的电气介数如下

$$B_e(p, q) = \sum_{i \in G, j \in L} (W_i W_j)^{1/2} |I^i(p, q)| \quad (1)$$

式中: $I^i(p, q)$ 表示在发电机与负荷节点对 (i, j) 间加上单位注入电流源后在线路 (p, q) 上引起的电流; W_i 为发电机 i 的权重, 取发电机额定容量或实际出力^[6]; W_j 为负荷节点 j 的权重, 取实际或峰值负荷; G 和 L 为所有发电和负荷节点的集合.

需要指出电气介数的不足是: 发电机 i 与负荷 j 间注入电流源后, 全系统所有线路(除辐射线路)上将产生电流, 承担发电机向负荷传输的作用, 这与电力系统中发电机向负荷传输只沿着一些线路的实际情况不符. 分析其原因, 电力网络是有向加权网络, 线路上的潮流具有方向性. 据此我们提出了有向电气介数指标.

(2)有向电气介数定义. 发电机 i 与负荷 j 间的功率 P_{ij} 往往通过几条路径进行传输, 由于每条路径上传递 P_{ij} 的比例不尽相同, 每条线路上通过的路径数也不相同, 所以造成每条线路在传输功率 P_{ij} 时承担的作用不同, 重要程度不同. 我们认为一条线路传输的功率 P_{ij} 越多, 它在发电机 i 向负荷 j 传输功率中越重要. 考虑所有经过线路的发电机与负荷节点对后, 得到线路在全网中的重要性排序.

根据电力系统潮流传播的特点并结合已有模型的基本思想, 可重新定义线路 l 的有向电气介数

$$B(l) = \sum_{i \in G, j \in L} P_{Gi} \frac{P_{ij}(l)}{P_{ij}} \quad (2)$$

式中: $P_{ij}(l)$ 表示发电机 i 向负荷 j 传输的功率在线路 l 上的分量.

新的介数 $B(l)$ 定义考虑了电网结构和系统运行方式, 反映了“发电-负荷”节点对之间潮流对线路的利用情况, 也量化了支路对全网潮流传播的贡献.

(3)有向电气介数求取. 依据式(2)求取每条线路的有向电气介数, 关键问题是求取发电机对负荷的贡献功率及每条线路的功率组成. 采用潮流追踪的方法, 首先在节点支路关联矩阵基础上, 分别进行

“顺流”和“逆流”跟踪计算,快速有效地计算发电机对线路功率的贡献因子和负荷对线路功率的汲取因子,确定每个发电机和负荷分别对线路潮流的影响.在此基础上,确定各条线路上各发电机与各负荷间实际传输功率和每台发电机向各个负荷传输的功率在每条线路上的分配.

1.2 有向全局导纳

有效效能模型^[11]采用全局有效效能来反映线路切除后系统状态的变化.全局有效效能定义为

$$T_G = \sum_{i \in G, j \in L} \frac{1}{s_{ij}} / N(N-1) \quad (3)$$

式中 s_{ij} 为 i, j 间的按权最短路径长度; N 为系统节点数.

现有全局效能没有考虑电力系统的特殊情况,适用于功率沿着最短路径传播的前提.为此,提出新的有向全局导纳指标如下

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \in G, j \in L} \frac{1}{\epsilon_{ij}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \in G, j \in L} e_{ij} \quad (4)$$

式中: ϵ_{ij} 、 e_{ij} 为 i, j 之间的有向等值阻抗和导纳.

发电机负荷间有向等值导纳的计算步骤如下,并以图 1 所示的试验系统为例说明发电机与负荷间的等值导纳的计算过程,括号内数字表示各条线路的导纳.

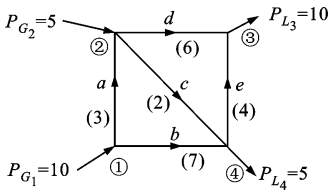


图 1 试验系统有向图

(1)采用产生有向图子图的方法,确定发电机与负荷间传输功率经过的所有线路^[14].在一个 n 节点的无圈有向图中,从节点 i 到 j 的所有路径的 P_{ij} 由 $(\mathbf{I}_n - \mathbf{D})^{-1}$ 的 (i, j) 元素来表示,其中 $\mathbf{I}_n$ 是 n 阶单位矩阵, $\mathbf{D}$ 是图的变元邻接矩阵,表达式为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 & b \\ 0 & 0 & d & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e & 0 \end{bmatrix}$$

所有从节点 i 到 j 的有向路径的集合表示为 $(\mathbf{I}_n - \mathbf{D})^{-1}$ 的非对角元素

$$(\mathbf{I}_n - \mathbf{D})^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & a & ad + ace + be & ac + b \\ 0 & 1 & d + ce & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

从式(5)得到发电机 G_1 与负荷 L_4 之间的有向路径共有两条,对应着矩阵 $(\mathbf{I}_n - \mathbf{D})^{-1}$ 中第 1 行第 4 列元素,分别为 $a \rightarrow c$ 和 b .

(2)求取节点 i, j 间的等值导纳 e_{ij} .其基本思想是在节点 i, j 间加上单位电流源 $i_s = 1$,求出端口 (i, j) 上的电压 u ,从而得到节点间的等值导纳 $e_{ij} = 1/u$.以求取图 2 中发电机 G_1 与负荷 L_2 间等值导纳为例,在发电机 G_1 与负荷 L_3 间加上单位电流源,以节点 4 为参考节点,首先形成节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{3 \times 3}$,依据式 $\mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}$,得到各节点电压,再根据 $e_{12} = 1/(u_1 - u_2)$,得到发电机 G_1 与负荷 L_2 间等值导纳为 8.2.

2 故障指标及故障模式的确定

2.1 故障指标

为了验证模型的正确性,选择反映故障传播广度和深度的两个系统状态指标.

指标 1:最大连通区域(MCA).最大连通区域是指网络发生解列后,所有连通区域中节点数最大的区域.最大连通域的大小指最大连通域中的节点数目.

指标 2:有向全局导纳 E .在连锁故障初期,少数线路被切除,不会引起系统解列,指标 1 没有变化,但是系统的状态肯定已经改变,发电机与负荷间功率的输送途径大大改变,这时通过指标 2 有向全局导纳的计算可以反映故障传播的深度.随着故障传播范围越广,连锁切除的线路增多,系统出现解列,此时指标 1 可以反映故障传播的广度.

2.2 故障模式

为了进一步探索脆弱性指标在故障传播中的作用,我们按照以下两种模式对系统进行攻击.

(1)高介数静态连锁攻击模式:计算得到全网线路的脆弱性指标后,按照从大到小的顺序每次切除一条线路.

(2)随机连锁攻击模式:采取随机选取线路攻击方式,即每次随机选择一条线路断开.

3 算例分析

为了验证算法的正确性,我们选用 IEEE-39 节点系统进行仿真计算,系统共有 10 台发电机、19 个

负荷和 46 条支路,但是依据注入纯功率考虑,节点 39 为负荷节点. 拓扑图如图 2 所示.

3.1 脆弱线路排序及验证

依照本文提出模型,对 46 条线路进行脆弱性指标计算并排序,结果如表 1 所示. 由于篇幅有限,只列出指标比较大的线路.

为了验证线路脆弱性指标的正确性,按照指标从大到小每次断开一条线路,再计算线路切除后系统的有向全局导纳指标,结果如图 3 所示.

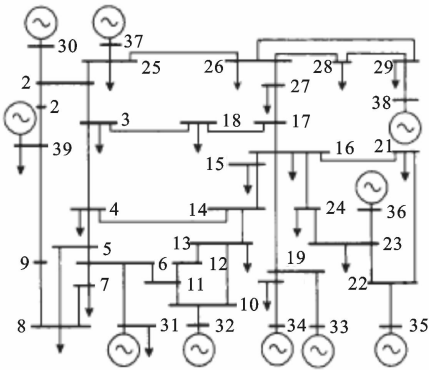


图 2 IEEE-39 节点系统接线图

表 1 线路有向电气介数排序

编号	线路名称	$B(l)$
1	16-17	73.680 0
2	35-22	58.500 0
3	17-18	55.260 0
4	23-24	46.054 7
5	22-21	45.145 3
6	36-23	44.800 0
7	33-19	44.240 0
8	21-16	38.645 3
9	19-16	37.920 0
10	37-25	37.800 0
11	3-18	36.840 0
12	16-24	33.954 7
13	38-29	33.200 0
14	32-10	32.500 0
15	3-4	26.320 0
16	25-2	21.600 0
17	16-15	18.420 0
18	17-27	18.420 0
19	31-6	16.921 0
20	6-7	16.699 0
21	10-13	16.576 1
22	10-11	15.923 9

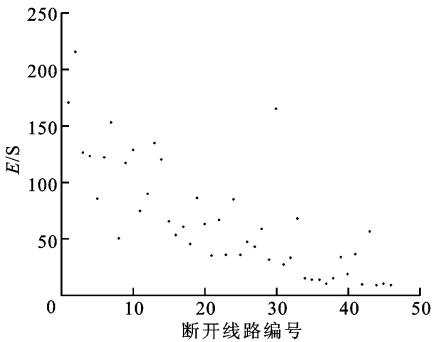


图 3 每次断开一条线路后有向全局导纳变化

分析图 3 可以得到以下结论.

(1)脆弱性指标越大的线路,其切除后系统有向全局导纳指标降低越多,对电网结构的影响也就越大,从而说明了线路脆弱性指标的正确性.

(2)线路的脆弱性指标与线路所处系统的拓扑位置有关,与其传输的功率大小无关. 线路 16-17 的脆弱性指标最大,但其传输的功率只有 206.05 MW.

(3)算法考虑了电力系统功率传输的特殊性,即不仅仅沿着最短路径传输. 当发电机和负荷间存在多条输电路径时,存在一条线路的切除使得等值导纳不为 0. 线路 33-19 与线路 21-16 的介数均为 6,且发电机 G_{33} 的出力小于发电机 G_{35} ,按照式(1)计算得到线路 21-16 应该更脆弱,但是线路 33-19 切除后系统有向全局导纳下降更多. 这是因为 21-16 切除后, G_{35} 与负荷 L_{16} 、 L_{15} 、 L_{27} 、 L_{18} 、 L_3 和 L_4 之间仍能进行功率传输.

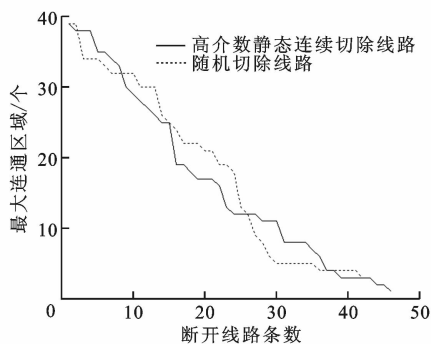
3.2 不同攻击方式下系统故障指标的变化

为说明关键线路、节点在故障传播中的重要作用,采用 2 种模式对系统进行攻击,并记录每次攻击后系统的故障指标,如图 4 所示.

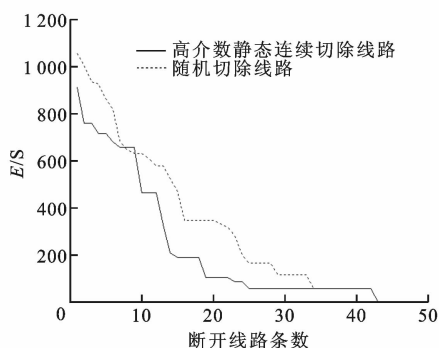
分析图 4,可以得到以下 2 点结论.

(1)图 4 显示高介数静态攻击线路系统最大连通区域和有向全局导纳的下降均快于随机攻击,说明系统在针对高介数线路/节点攻击下具有脆弱性,这和已有模型结论相一致,证明本文判据的有效性.

(2)在连锁切除线路初期,系统的最大连通区域没有发生变化,这是由于有向电气介数排序靠前的线路没有组成网络的割集,这和静态切除线路有关. 但是,从系统的有向全局导纳来看,高介数切除线路攻击要比随机切除线路攻击下降快得多. 这再一次说明系统状态的变化不能只靠一个指标来体现.



(a)最大连通区域的变化



(b)有向全局导纳的变化

图4 不同攻击模式下系统状态的变化

4 结 论

在当前运行方式下,考虑网络结构的脆弱性,将电力网络作为有向加权网络考虑.基于线路功率组成,提出了将有向电气介数作为线路脆弱性指标,真实地反映出发电与负荷节点对之间功率传输对各线路的占用情况,并且引入发电机出力来考虑不同电压等级线路阻抗的差异,能有效识别出系统的关键线路,同时将传统的只考虑发电机负荷间最短路径的全局效能指标替换为考虑发电机负荷间所有传输路径的有向全局导纳指标.这样的物理背景更符合电力系统的实际情况.通过对 IEEE-39 节点系统进行仿真,结果表明了有向电气介数能够很好地识别脆弱线路,同时验证了电力系统在针对高有向电气介数线路的攻击下更为脆弱.

但是,在模型中假设发生连锁故障时电气介数最大的线路必然发生故障,这和实际情况不符.如何进一步考虑电气介数和线路故障间的关系,及对连锁故障过程的进一步模拟,是未来的研究方向.

参考文献:

[1] 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[EB/OL]. [2010-09-03]. <http://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>.

[2] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1-6.

HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.

[3] 唐葆生. 伦敦地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.

TANG Baosheng. Blackout in south of London and its lessons [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.

[4] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.

HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North American power grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.

[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(S0): 118-122.

DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(S0): 118-122.

[6] 曹一家,陈晓钢,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.

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, 31.

[7] 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.

NI Xiangping, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Transmission lines' vulnerability assessment based on complex network theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 1-5.

[8] 陈晓刚,孙可,曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.

CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.

[9] REKA A, ISTVAN A, NAKARADO G L. Structural

- vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review: E, 2004, 69(2):025101-025104.
- [10] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review: E, 2002, 66(2):1-4.
- [11] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. The European Physical Journal, 2005, 46(1): 101-107.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 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.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1):33-39.
- [14] 陈惠开. 应用图论[M]. 北京:人民邮电出版社, 1990: 40-62.

(编辑 杜秀杰)