

文章编号: 1005-0523(2015)06-0100-06

基于潮流游走介数的电网脆弱环节辨识方法研究

王 勋, 李林哲, 肖永乐, 康嘉斌

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 大停电事故的发生,除了人为误操作等因素以外,电网中自身存在的不稳定因素才是事故发生的根源。对于电网中脆弱元件的识别,传统的方法往往仅偏重于分析网络结构脆弱性或者状态脆弱性中的某个方面,缺乏一种全局的观念。因此,本文基于随机游走算法和潮流跟踪理论,综合考虑电网的拓扑结构和运行状态,通过计算式来分析电网中发电机因子和负荷因子对潮流传输的影响,从中研究了一种通过潮流游走介数来辨识电力系统中脆弱环节的方法。通过仿真分析,验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 脆弱元件; 拓扑结构; 运行状态; 潮流游走介数

中图分类号: TM712

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.016

近年来国内外发生了多起大停电事故,严重影响到人民的生活,关于电网脆弱性的评估已经引起人们越来越多的关注^[1]。对电网中脆弱元件进行准确识别,采取事前控制措施,可以降低事故发生的可能性,减少事故产生的危害^[2]。

对电网脆弱环节的识别,文献[3]从网络拓扑的角度着手,验证了高度数节点在网络中的重要性,但其未考虑到潮流流动的方向性问题;文献[4]考虑了电网潮流和元件负荷能力,但是该方法假设潮流沿着母线间最短路径传输,不符合电网实际;文献[5]基于基尔霍夫定律,定义的传输贡献度有利于对电网脆弱环节进行辨识,将状态脆弱性和结构脆弱性结合起来,但缺乏全局的观念。

本文借鉴了文献[6]中随机游走算法的思想,引入潮流游走介数,对电网脆弱环节的辨识展开研究。即假设网络潮流为一种概率模型下的随机分布,其流动的路径不依照电源节点和负荷节点之间的最短路径,而是具有充分的随机性,将复杂网络理论中的随机游走算法拓展到电网中进行分析。

1 基于潮流游走介数的脆弱元件识别方法

文献[7-8]将潮流跟踪的思想引入到电力系统分析中,目前该理论主要用于研究电力市场中的节点电价和网损分配。本文将潮流跟踪理论和随机游走介数二者相结合^[9],研究了潮流游走介数的概念,综合电网中的发电机因子和负荷因子,从状态脆弱性和结构脆弱性两方面对电网中的脆弱线路和脆弱节点进行识别。

1.1 加权模型的建立

电网中的潮流是从发电机节点流出,经过网络流入负荷节点。在考虑随机路径的计算时,可将发电机节点设置为初始节点,负荷节点设置为终点节点,通过以网络的阻抗倒数为线路边权重的模型来计算随机游走介数。关于随机游走介数的计算在文献[9]中已经给出,并且通过仿真分析验证了其对于识别电网中脆弱环节的可行性。

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267004);江西省科技支撑计划项目(20144BBE50008);南昌市科技局资助项目(2013HZLG013)

作者简介: 王勋(1960—),男,教授,硕士生导师,研究方向为变电站自动化、牵引供电系统理论分析。

根据随机游走介数的概念,结合电网拓扑和运行状态对电力系统线路和节点的重要性进行评价。电网运行的主要任务是有效实现“发电-负荷”节点对之间的潮流传输,因此分析并度量系统中元件对发电机节点和负荷节点对之间潮流流动的影响程度就具有重要的意义。通过对网络节点与线路的潮流输送关系的分析计算,得到系统潮流在各个环节之间的转移分配量,进而分析这些环节对“发电-负荷”节点对之间潮流的利用情况,并且借助潮流游走介数的概念分析元件本身所处的拓扑特点,即可量化线路和节点对电网中潮流传输的影响。这种方法可用于系统脆弱节点和脆弱线路的识别,并且该评估模型避免了以往一些假设潮流只沿最短路径流动的不足。

1.2 节点潮流游走介数

考虑节点在实际电网运行状态下的潮流输送关系和其在发电端以及受电端产生的作用,定义节点潮流游走介数的计算式为

$$B_k = W_k (W_G G_k + W_L L_k) \quad (1)$$

式中: B_k 为节点 k 的潮流游走介数; W_G 为电网中发电机权重的因子; W_L 为负荷权重因子; G_k 和 L_k 分别为节点 k 潮流游走介数的发电机和负荷因子; W_k 为节点 k 的潮流传输权重因子。

1) 节点潮流游走介数的发电机因子 G_k :

$$G_k = \frac{n_G}{n} \sum_{s=1}^{n_G} \frac{P_{sk}}{b_k} \quad (2)$$

式中: n_G 为给节点 k 输送潮流的发电机节点的数量; n 为电网中总的节点数; P_{sk} 为发电机节点 s 贡献给节点 k 的有功功率; b_k 为节点 k 的随机游走介数。

2) 节点潮流游走介数的负荷因子 L_k :

$$L_k = \frac{n_L}{n} \sum_{s=1}^{n_L} \frac{P_{tk}}{b_k} \quad (3)$$

式中: n_L 为从节点 k 吸收潮流的负荷节点的数量; P_{tk} 为负荷节点 i 从节点 k 吸收的有功潮流。

3) 节点潮流传输权重因子 W_k :

$$W_k' = p_k \frac{\min(P_{k\lambda}^{\max}, P_{k\mu}^{\max})}{\min(P_{k\lambda}^{\max}, P_{k\mu}^{\max}) - p_k} \quad (4)$$

其中, W_k' 为节点 k 的潮流传输权重; p_k 为节点 k 的实际潮流。将 W_k' 归一化后,有

$$W_k = 1 + \frac{W_k' - \min(W_k')}{\max(W_k') - \min(W_k')} \quad (5)$$

式中: $P_{k\lambda}^{\max}$ 为流入节点 k 功率的上限; $P_{k\mu}^{\max}$ 为流出节点 k 功率的上限,考虑到流经节点 k 的功率上限不一定相等,为保证电网的稳定,取两者中较小的一个,且 $\frac{\min(P_{k\lambda}^{\max}, P_{k\mu}^{\max}) - p_k}{\min(P_{k\lambda}^{\max}, P_{k\mu}^{\max})}$ 为节点 k 潮流传输裕度。

1.3 线路潮流游走介数

同理,考虑到发电机和负荷的双重作用,定义线路潮流游走介数的计算式为

$$B_{ij} = W_{ij} (W_G G_{ij} + W_L L_{ij}) \quad (6)$$

式中: B_{ij} 为线路 ij 的潮流游走介数; G_{ij} 和 L_{ij} 为线路 ij 潮流游走介数的发电机和负荷因子; W_{ij} 为线路 ij 的潮流传输权重因子。

1) 线路潮流游走介数的发电机因子 G_{ij} :

$$G_{ij} = \frac{n_G}{n} \sum_{s=1}^{n_G} \frac{P_{sij}}{b_{ij}} \quad (7)$$

式中: n_G 为给线路 ij 输送潮流的发电机节点的数量; P_{sij} 为发电机节点 s 贡献给线路 ij 的有功功率; b_{ij} 为线路 ij 的随机游走介数。

2) 线路潮流游走介数的负荷因子 L_{ij} :

$$L_{ij} = \frac{n_{L_{ij}}}{n} \sum_{t=1}^{n_{L_{ij}}} \frac{P_{tj}}{b_{ij}} \quad (8)$$

式中: $n_{L_{ij}}$ 为从线路 ij 吸收潮流的负荷节点的数量; P_{tj} 为负荷节点 t 从线路 ij 吸收的有功潮流。

3) 线路潮流输送权重因子 W_{ij} :

$$W_{ij}' = p_b \frac{p_b^{\max}}{p_b^{\max} - p_b} \quad (9)$$

其中, W_{ij}' 为线路 ij 的潮流输送权重; p_b 为线路 b 的实际潮流。将 W_{ij}' 归一化后, 有

$$W_{ij} = 1 + \frac{W_{ij}' - \min(W_{ij}')}{\max(W_{ij}') - \min(W_{ij}')} \quad (10)$$

式中: p_b 为电网中流经某条线路 b 的实际潮流; p_b^{\max} 为该线路的潮流上限, 且 $\frac{p_b^{\max} - p_b}{p_b}$ 为此线路的潮流传输裕度。

2 算例分析

2.1 电网脆弱节点辨识

选取 IEEE39 节点网络系统进行分析^[10], 利用随机游走算法, 线路的电抗值为加权边的权值大小, 使用 matpower 软件计算出各节点的随机游走介数值。取发电机和负荷的权重因子均为 0.5, 结合潮流跟踪理论, 计算出网络中节点的潮流游走介数, 并与其他文献提出的节点度指标、节点电气介数指标、节点功率介数指标进行对比^[10-12], 分别选取指标值排在前 10 的节点, 如表 1 所示。

由于指标①只是单纯的重视网络的拓扑结构而没有顾及电网中状态物理量的电气关系, 因此不符合电网的实际情况, 而对比②和③两类指标, 本文的④指标排名前 10 的节点大多与其重要性排名相似。

1) 对比④和①: 节点 4 与节点 2 的排序发生了变化, 这是由于节点 4 传输通道单一, 因此在故障后潮流对电网中其余节点和线路形成的冲击就比较集中, 而节点 2 在故障后功率可以通过多条途径进行分散传输;

2) 对比④和②: 在提高 6 节点重要性的同时很明显地降低了节点 14 的重要性, 这是由于节点 6 作为平衡节点 31 的唯一外送通道且担任着重负荷节点 7 和 8 的功率传输任务, 而节点 14 出现故障时, 其负责供电的 4 和 15 节点可以从其他路径获得电能;

3) 对比④和③: 显著地提高了节点 16 与 17 的重要性排序, 这是由于二者的评估模型考虑影响因素的侧重点不同, 本文运用随机介数进行计算, 而方法③选择的是网络的拓扑介数, 因此评估结果也会有所差异。

2.2 脆弱节点连锁攻击校验

对表 1 中 4 种指标进行稳定性校验, 本文设计了以下 5 种攻击模式, 进行 15 次攻击, 观察系统失负荷比例以及网络连通性水平的变化情况。图 1 和图 2 是连锁攻击校验后, 系统失负荷以及网络最大连通度的变化曲线。

表 1 不同节点重要性指标对比

Tab.1 Comparison of importance index at different node

排序	① 度	② 电气介数	③ 功率介数	④ 潮流游走介数
1	16	16	10	16
2	2	17	6	17
3	6	14	22	10
4	26	2	7	6
5	3	26	8	14
6	4	3	11	15
7	5	5	31	8
8	8	18	23	7
9	10	25	24	4
10	11	4	5	2

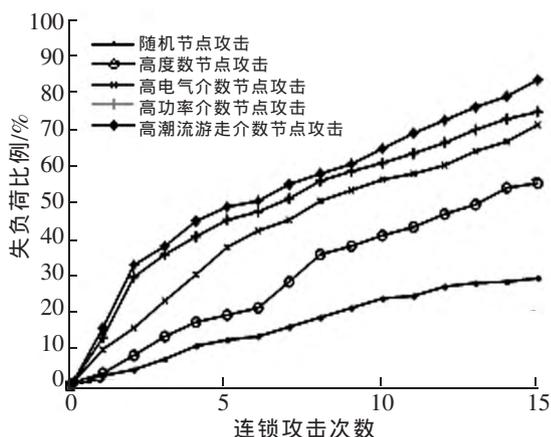


图 1 连锁攻击下系统失负荷比例变化曲线

Fig.1 The proportion change curve of system's load loss under continuous attack

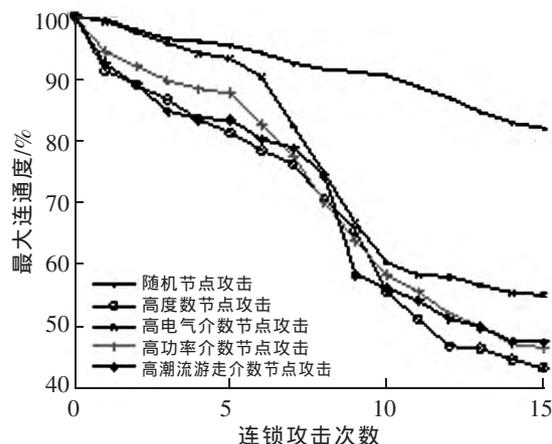


图 2 连锁攻击下系统最大连通度变化曲线

Fig.2 The change curve of the biggest connectivity under continuous attack

分析后可以发现：

1) 对系统进行随机节点连锁攻击 15 次后,系统的失负荷比例和最大连通度并没有发生很严重的影响,说明系统对于随机攻击有较强的鲁棒性;

2) 高潮流游走介数在攻击后对于系统的失负荷比例和最大连通度的影响程度最为严重,变化速度也最为剧烈,说明高潮流介数节点遭受到连续地蓄意攻击时,系统的脆弱性表现的最为明显,反映出本文方法的有效性;

3) 在图 2 中潮流游走介数与功率介数在连锁攻击的过程中出现了几次不同程度的差异,也说明了本文与传统指标的分析侧重点不同,反映了本文方法的合理性。

2.3 电网脆弱线路辨识

电网事故的发生往往源于线路的故障,因此对于辨识出系统中的脆弱线路相比于识别节点脆弱性的重要程度会更大。将本文的方法与基于电气介数、基于最大流的贡献度、基于潮流熵的方法识别出的前 10 条脆弱线路进行比较,比较结果见表 2。

表 2 脆弱线路辨识结果对比
Tab.2 Comparison of vulnerable line identification results

排序	① 电气介数	② 最大流传输贡献度	③ 潮流熵	④ 潮流游走介数
1	15-16	16-17	5-6	16-17
2	16-17	2-3	16-19	10-32
3	14-15	14-15	19-20	15-16
4	16-19	15-16	6-7	16-19
5	2-3	16-19	6-11	2-30
6	13-14	4-14	15-16	14-15
7	16-24	4-5	4-5	17-27
8	2-25	17-27	2-25	5-6
9	4-5	3-4	13-14	21-22
10	17-18	3-18	16-17	3-18

从表2可以看出,本文方法识别出的脆弱线路排名与其余3种方法中的排名类似,说明了本文方法有效性:

1) ④中大幅度提升了发电机节点32和30的出口线路10-32以及2-30的重要性,因为虽然这两条线路在电网中的潮流输送任务不大,但是其故障将会导致发电机潮流无法输送,系统部分区域的供电也将受到影响;

2) 对比④与①:提升了线路16-17与17-27重要性,由于线路16-17是负荷区的主要电能传输途径,其故障将导致发电机33,34,35,36的潮流外送途径减少,易发生功角失稳,而线路17-27处于两负荷区的连接区域,若故障将会降低供电的可靠性;

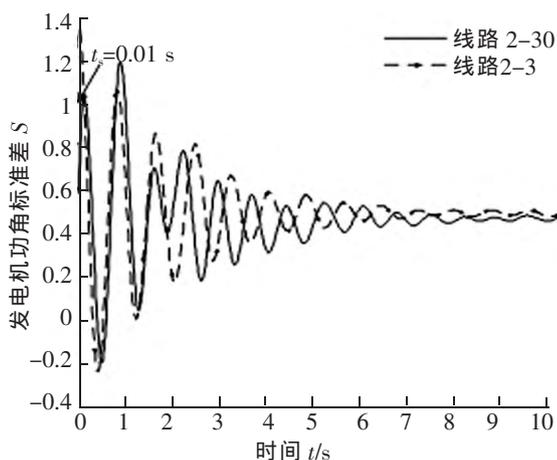
3) 对比④与②:降低了线路4-14与4-5的重要性,这是由于4节点作为重负荷节点,有4-14,4-3,4-5共3条线路进行电能传输,根据 $N-1$ 安全检验准则,4负荷节点的供电不会因为3条线路中的某条线路出现故障而受到巨大影响;

4) 对比④与③:本文计算出线路5-6的潮流游走介数值较小,方法③中却把该线路的脆弱性列在首位。潮流熵的方法认为线路5-6作为重载线路,其故障会引起较大范围的潮流转移,并且转移的潮流会在其他支路上聚集,引起更多支路开断,而本文的模型不仅考虑了线路的状态脆弱性,同时也关注了线路在网络中所处的拓扑结构,因此判断更为全面。

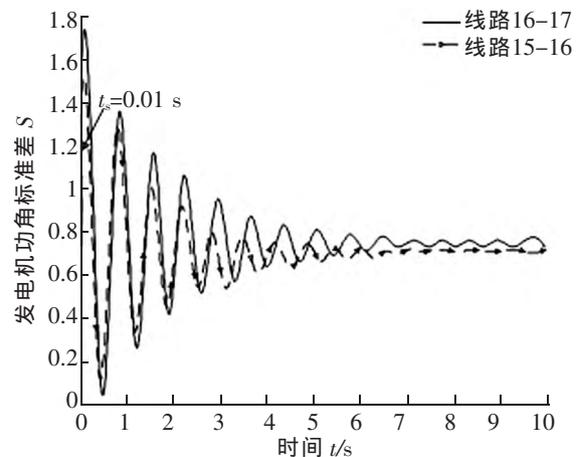
2.4 脆弱线路时域仿真分析

利用PST2.0软件进行时域仿真, $t=0$ 时刻电网开始稳定运行,令 $t=0.1$ 时线路高压侧发生三相接地短路故障, $t=0.16$ s时继电保护正常动作,在 $t=0.2$ s时完全切除故障,仿真时间设为10s,记录系统内所有10台发电机的功角波动曲线,用其标准差体现数据的变化幅度。相比于以往的方法,本文主要在线路2-3,2-30,14-15,15-16,16-17,16-19作出了调整,因此用这些线路进行时域分析,仿真结果如图3。

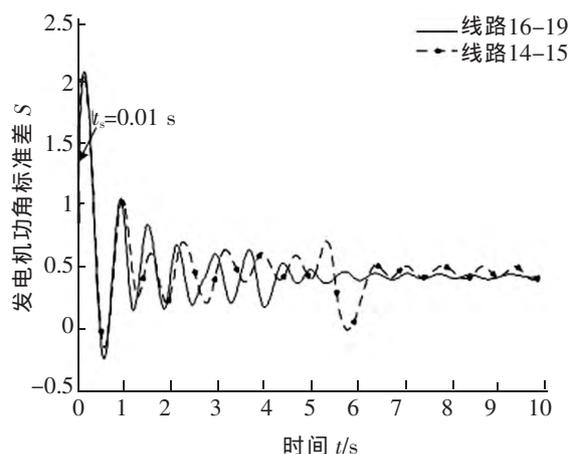
分析图3曲线:当线路16-17与15-16发生故障后,前者的功角摆动更严重,与本文基于潮流游走介数的判断方法的结论一致;而对比线路2-



(b) 线路2-30,2-3时域仿真图



(a) 线路16-17,15-16时域仿真图



(c) 线路16-19,14-15时域仿真图

图3 发电机功角偏差曲线

Fig.3 Angle deviation curve of the generator

3与2-30的变化曲线,发现发电机出口线路2-30相较于线路2-3对故障的忍受能力更低,因此更加脆弱;线路16-19与14-15的波动周期一致,然而由于前者距发电机33和34的距离较近,因此它的故障对于这两台机组的功角稳定性必然会产生影响。对比时域仿真的结果,表明了本方法能够有效识别出网络中的脆弱线路。

3 结论

在电网拓扑结构的分析中引入了复杂网络理论的随机游走理论,在此基础上结合潮流跟踪理论研究了潮流游走介数的概念,通过计算式对电网中的脆弱节点和脆弱线路进行识别,最后通过IEEE39节点系统进行仿真分析,验证了文中方法对于辨识电网脆弱元件的有效性。

参考文献:

- [1] 李林哲,王勋,詹骥文. 一种通过贡献矩阵评估系统脆弱性的方法[J]. 华东交通大学学报,2014,31(2):123-131.
- [2] 张保会. 广域动态条件下电网安全紧急控制的研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):1-8.
- [3] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E, 2004,69(2):1-10.
- [4] 陈为化,江全元,曹一家,等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术,2005,29(4):12-17.
- [5] 鞠文云,李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):6-12.
- [6] NEWMAN M E J. A measure of betweenness centrality based on random walks[J]. Social Networks,2005,27(1):39-54.
- [7] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEEE Proceeding-Generation Transmission Distribution,1996,143(4):313-320.
- [8] 吴晓蓉,谢开贵,周家启. 基于电流实部与虚部双向追踪的输电设备利用份额模型及应用[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):12-17.
- [9] 潘高峰. 基于复杂网络理论的电网脆弱性研究[D]. 广州:广东工业大学,2014.
- [10] 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.
- [11] 刘艳,顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):20-27.
- [12] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术,2014,38(7):1907-1913.

Identification Methods of Fragile Parts in Power Grid Based on Flow Walking Betweenness

Wang Xun, Li Linzhe, Xiao Yongle, Kang Jiabin

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Besides human error and other factors, the unstable factor in the power grid itself is the root cause of blackout accidents. For the identification of vulnerable components in power system, the traditional methods often only focus on analyzing network structure's vulnerability or state's vulnerability, which is in lack of a global concept. Therefore, based on the random walk algorithm and trend tracking theory, considering the topology and operation state of grid, this paper studied a method using the flow walking betweenness to identify fragile parts of the grid and analyzed the influence of grid generator factor and load factor on the current transmission through the calculating formula. The simulation analysis validated the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: fragile element; topology structure; running state; flow walking betweenness

(责任编辑 刘棉玲)