

Identification of Vulnerable Lines in Power Grid Based on Complex Network Theory

Xi Zhu

State Grid Zhangzhou Power Supply Company, Zhangzhou Fujian
Email: 523738319@qq.com

Received: Mar. 28th, 2018; accepted: Apr. 19th, 2018; published: Apr. 26th, 2018

Abstract

Based on the complex network theory, this paper proposes a new method to measure the vulnerability of power grid. This paper gives a new weight formula and a algorithm to identification of vulnerable lines. The analysis has been carried out on the IEEE5 bus system, which confirms the efficacy of the method.

Keywords

Complex Network Theory, Vulnerability, Weighting Parameters, Efficiency

基于复杂网络理论的电网脆弱线路的识别

术 茜

国网漳州供电公司, 福建 漳州
Email: 523738319@qq.com

收稿日期: 2018年3月28日; 录用日期: 2018年4月19日; 发布日期: 2018年4月26日

摘 要

在复杂网络基础上, 本文提出新的参数来评估电网脆弱性。文中给出了新的权重公式与脆弱线路辨识的算法, 并通过IEEE5节点系统证实方法有效性。

关键词

复杂网络理论, 脆弱性, 权重参数, 效能

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1959年, Rényi 等专家提出随机网络的概念[1]。1998年 Watts 和 Strogatz 提出小世界(Small-World)网络概念[2], 1999年 Barabási 和 Albert 发现无标度(Scale-Free)网络特性[3], 推动了复杂网络研究的发展。

近年来复杂网络已被用于对电网建模和分析[4] [5] [6] [7] [8], 例如: Albert 在 2003 年 8 月美国电网大停电后, 分析北美电网的脆弱性[9]; 同样, Crucitti 分析了意大利电网的大规模停电和连锁故障[10]; Motter 和 Lai 指出[11], 由于电网中一些重要节点出现故障, 引起的节点负荷重新分配可以导致连锁故障。

复杂网络理论认为每个网络都有一些关键线路连接, 这些连接使系统在遭受攻击时很脆弱。如果这些关键连接可预先识别, 就可以大大提高网络可靠性。

本文提出一种基于系统潮流分析的新的权重参数, 并通过 IEEE5 节点系统算例验证参数的有效性。

2. 复杂网络理论中的基本概念

1) 平均路径长度: 所有节点对之间距离的平均值。

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

2) 节点度数: 节点的度数是指连接该节点的边数。

3) 网络平均度数 K : 全部节点度数的平均值。网络的平均度数可表示为:

$$K = 2E/n \quad (2)$$

4) 线路介数值: 线路被网络中发电机与负荷节点间最短路径所通过的次数。

3. 权重与效能参数的新定义

1) 权重参数的新定义

为简化模型, 我们假设线路传输过程中没有损耗[12]。由于功率流将取决于节点电压和线路电抗, 因此, 从节点 i 到 j 的功率传输可表示如下:

$$P = \frac{v_i v_j}{x_{ij}} \sin \alpha_{ij} \quad (3)$$

其中: P 是流经线路的有功功率; v_i 、 v_j 为节点 i 、 j 的电压; α_{ij} 为电压相位角; x_{ij} 为线路电抗。

根据以上分析, 考虑电网的实际运行特性, 本文提出表征线路在输送功率中重要性的新的权重参数, 表示如下:

$$\omega_{ij} = \frac{x_{ij}}{v_i v_j} \quad (4)$$

2) 系统故障指标效能的新定义

在电网中, 最短路径就是电网的最短电气路径。假定更多功率将流过电抗值较小, 节点间电压值较大的路径, 本文以 ω_{ij} 作为该线路的权重, 最短电气路径为沿两节点间全部路径中线路权重和最短的路径,

可以由邻接矩阵 A 和连接的权值来计算。

系统的效能 E 定义为网络中所有发电机与负荷节点间最有效路径的均值，其定义为：

$$E = \frac{1}{N_L N_G} \sum_{i \in N_L} \sum_{j \in N_G} e_{ij} \quad (5)$$

或

$$E = \frac{1}{N_L N_G} \sum_{i \in N_L} \sum_{j \in N_G} \frac{1}{\omega_{ij}} \quad (6)$$

其中： E 是网络的效能； N_L 和 N_G 分别代表网络负荷节点总数与发电节点总数； i 、 j 分别代表 N_L 和 N_G 中的节点编号； e_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的效能； ω_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的最短电气距离。

4. 脆弱线路辨识

电力网络可以通过连接矩阵 $E = \{e_{ij}\}$ 来建模；假设网络 $G = (V, E)$ 由 n 个节点和 k 条边构成，那么连接矩阵中的 e_{ij} 代表网络的连通性。如果节点间有直接相连，则 $e_{ij} = 1$ ，否则 $e_{ij} = 0$ 。

高介数值线路被拆离，会导致网络平均路径长度剧增，系统效能降低[13]。基于此，本文通过介数值识别关键线路。

脆弱线路的辨识步骤如下：

- 1) 建立电力系统网络模型，并生成一个连接矩阵 A ；
- 2) 由线路电抗和电压给输电线路赋予权值；
- 3) 由邻接矩阵 A 和权值计算最短电气路径；
- 4) 根据介数值指标计算线路介数值；
- 5) 介数值高的线路为脆弱线路。

5. 算例分析

本文采用 IEEE5 节点系统，各节点编号 1、2、3、4、5 和支路编号(1)、(2)、(3)、(4)、(5)如图 1 标注，系统参数来自文献[14]，如表 1 所示。

IEEE5 节点系统由 5 个节点和 5 条边组成。其中节点 4 和 5 为发电节点，节点 1、2、3 为负荷节点。系统的邻接矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由公式(4)求得各条线路的权值为：

$$\begin{aligned} \omega_{(1)} = \omega_{12} = 0.26901, \quad \omega_{(2)} = \omega_{13} = 0.39170 \\ \omega_{(3)} = \omega_{23} = 0.26854, \quad \omega_{(4)} = \omega_{24} = 0.01325 \\ \omega_{(5)} = \omega_{35} = 0.02757 \end{aligned}$$

根据邻接矩阵 A 和计算求得的权值计算最短电气路径。下面列出最短电气路径：

从发电节点 4 到负荷节点 1，经过线路(4)和(1)，最短电气距离为 0.28226；

从发电节点 4 到负荷节点 2, 经过线路(4), 最短电气距离为 0.01325;
 从发电节点 4 到负荷节点 3, 经过线路(4)和(3), 最短电气距离为 0.28179;
 从发电节点 5 到负荷节点 1, 经过线路(5)和(2), 最短电气距离为 0.41927;
 从发电节点 5 到负荷节点 2, 经过线路(5)和(3), 最短电气距离为 0.29611;
 从发电节点 5 到负荷节点 3, 经过线路(5), 最短电气距离为 0.02757。
 由线路介数值的定义求得各条线路的介数值如表 2。

由计算结果得出, 介数值高的线路(5)、(4)、(3)为脆弱线路。同样的 IEEE5 节点系统, 文献[15]基于

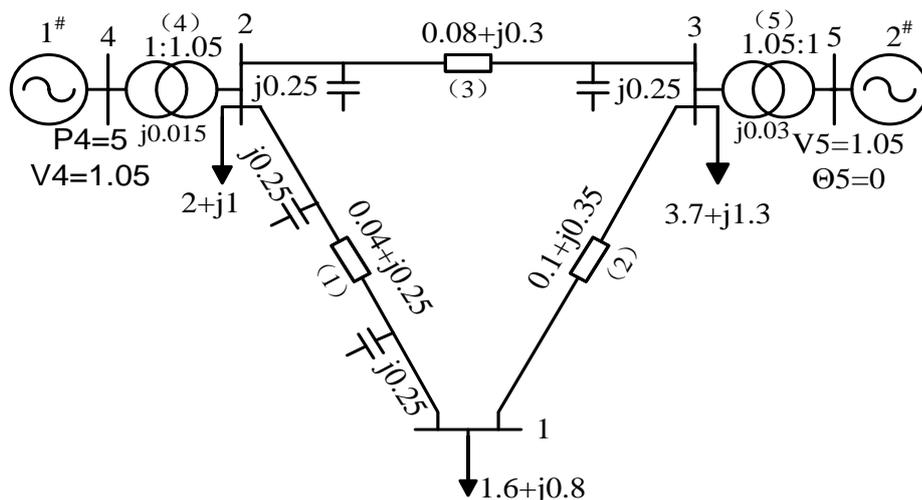


Figure 1. IEEE 5 Bus System
 图 1. IEEE5 节点系统图

Table 1. Parameters of the system.
 表 1. 系统参数

线路编号	线路端点	线路电抗	节点编号	节点电压
(1)	L ₁₋₂	0.25	1	0.862150
(2)	L ₁₋₃	0.35	2	1.077916
(3)	L ₂₋₃	0.3	3	1.036411
(4)	L ₂₋₄	0.015	4	1.050000
(5)	L ₃₋₅	0.03	5	1.050000

Table 2. Betweenness of the lines
 表 2. 线路的介数值

线路编号	线路端点	线路介数
(1)	L ₁₋₂	1
(2)	L ₁₋₃	1
(3)	L ₂₋₃	2
(4)	L ₂₋₄	3
(5)	L ₃₋₅	3

直流潮流与分布因子法得出支路(1)、(3)、(5)是系统的脆性源。由图 1 可以看出, 线路(4)是连接发电节点 4 与其它节点的必经之路。如果线路(4)断开, 发电机 1 将退出运行, 负荷就只能从发电机 2 获得电能。本文计算的脆弱线路特点为都在重要的输送电力路径上, 其故障将直接导致停电事故的发生, 相对文献 [15]的准确性更高。

利用系统遭受袭击后网络的敏感性来验证网络的脆弱线路。袭击线路 5 后, 发电节点 5 与网络断开, 仅有发电节点 4 与网络连接。由公式(6)计算出网络的效能仅为故障前的 66.3%。连续袭击线路介数值大的线路 4 后, 网络的效能变为 0, 整个系统崩溃。同理, 如果先袭击线路 4, 网络的效能仅为故障前的 33.7%, 再袭击线路 5 同样使网络效能为 0, 进一步验证了线路的脆弱性。

6. 结论

本文提出了依据输电线路的电抗与电压作为权重, 通过介数值来评估脆弱线路。按照本文的方法分析了 IEEE5 节点系统, 确定了脆弱线路, 证实了方法的有效性。

参考文献

- [1] Erdős, P. and Rényi, A. (1959) On the Evolution of Random Graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.*, **5**, 17-60
- [2] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of “Small World” Net Works. *Nature*, **393**, 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [3] Barabasi, A.L. and Albert, R. (1999) Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, **286**, 509-512.
- [4] Sun, K. (2005) Complex Networks Theory: A New Method of Research in Power Grid. *Proc. IEEEIPES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, 1-6.
- [5] Zhao, H., Zhang, C. and Ren, H. (2008) Power Transmission Network Vulnerable Region Identifying Based on Complex Network Theory. *Proc. 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Nanjing, 1082-1085.
- [6] Lu, Z.X., Meng, Z.W. and Zhou, S.X. (2004) Cascading Failure Analysis of Bulk Power System Using Small-World Network Model. *Proc. 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Iowa State University, Ames, 635-640.
- [7] Zhang, G.H., Wang, C., Zhang, J.H., Yang, J.Y., Zhang, Y. and Duan, M.Y. (2008) Vulnerability Assessment of Bulk Power Grid Based on Complex Network Theory. *Proc. 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Nanjing, 1554-1558.
- [8] Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M. (2004) A Topological Analysis of the Italian Electric Power Grid. *Physica A*, **338**, 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.02.029>
- [9] Alhert, R., Alhert, I. and Nakarado, G.L. (2004) Structural Vulnerability of the North American Power Grid. *Physical Review E*, **69**, No. 025103.
- [10] Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M. (2004) Model for Cascading Failures in Complex Networks. *Physical Review E*, **69**, No. 045104 (R).
- [11] Saccomanno, F. (2003) Electric Power Systems. *IEEE Press Power Engineering Series*, 45-47. <https://doi.org/10.1002/0471722901>
- [12] Dwivedi, A., Yu, X.H. and Sokolowski, P. (2009) Identifying Vulnerable Lines in Power Network Using Complex Network Theory. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 18-23.
- [13] 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.
- [14] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 刘耀年, 刘玉良, 李阳, 等. 电力系统脆性风险源辨识方法的研究[J]. 华东电力, 2010, 38(11): 1725-1728.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0514，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aepe@hanspub.org