

电网脆弱性评估方法研究

谢春瑰¹, 方菲², 吕项羽¹, 林涛², 蔡丽霞¹, 刘慧²

(1. 吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021; 2. 武汉大学 电气工程学院,
湖北 武汉 430072)

Research on Power Grid Vulnerability Assessment Methods

XIE Chun-gui¹, FANG Fei², LÜ Xiang-yu¹, LIN Tao², CAI Li-xia¹, LIU Hui²

(1. Jilin Electric Power Research Institute, Changchun 130021, Jilin, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

ABSTRACT: Based on the improved electrical betweenness, this paper studies the structural vulnerability evaluation model; based on the short-circuit capacity, it studies the state vulnerability evaluation model. On the basis of the studies, it puts forward an unified evaluation to evaluate the vulnerability of the power grid. Rationality and effectiveness of this evaluation index is verified through the IEEE-39 node example.

KEY WORDS: structure vulnerability; state vulnerability; electrical betweenness; short-circuit capacity

摘要: 基于改进电气介数研究了电网的结构脆弱性评估模型, 并基于短路容量研究了电网的状态脆弱性评估模型, 在此基础上形成了电网脆弱性的统一评价指标, 通过IEEE-39节点算例验证了该评价方法的合理性与有效性。

关键词: 结构脆弱性; 状态脆弱性; 电气介数; 短路容量

近年来, 世界范围内相继发生了许多起电网崩溃和大面积停电事故^[1], 造成了巨大的经济损失和社会影响。随着大功率、远距离输电线路的出现, 以及区域电网互联的大规模电力系统的形成, 使得大面积停电事故发生的概率增加。日益复杂的电力系统网架结构难免会出现一些比较脆弱的环节, 在系统出现扰动的情况下, 这些薄弱环节极易出现故障退出运行并引发连锁故障, 导致大停电事故的发生, 给电网带来难以挽回的损失和重大的影响。因此, 需要科学地评估输电网络的脆弱性, 分析电网存在的潜在危险, 对可能存在的薄弱环节及时提出合理有效的改进措施。

根据研究角度的不同, 电力系统脆弱性的评估分析可以分为结构脆弱性评估和状态脆弱性评估

两部分内容。结构脆弱性反映了电力系统网架结构的固有脆弱性, 其主流的研究方法是基于复杂网络理论的评估方法^[2-3]; 状态脆弱性的研究方法主要有能量函数法^[4]和基于概率的风险理论分析法^[5], 其评估指标主要有基于节点电压、频率以及功角的暂态稳定节点的状态脆弱性分析指标模型。由于电网元件的脆弱性既与其在网架结构的重要性(结构脆弱性)有关, 又与其运行状态(状态脆弱性)有关, 因此需要建立兼顾这两方面的综合脆弱性评估模型^[6]。

1 结构脆弱性分析模型

结构脆弱性是研究电力系统中某一单元退出运行或某一些单元相继退出运行后, 电网的拓扑结构能够保持完整并且继续保持正常运行的能力^[3], 反映了电力系统网架结构的固有脆弱性。

本文发展了改进电气介数模型^[3], 并研究了电网的结构脆弱性, 克服了加权介数模型假设母线间潮流只沿最短路径流动的不足, 有效反映各“发电-负荷”节点对间潮流传输对线路的真实利用情况。

根据拓扑建模以及电路的基本方程转换, 可以得到线路 (m, n) 的电气介数指标 $B_e(m, n)$, 如式(1)所示。

$$B_e(m, n) = \sum_{i \in G, j \in L} |W_i I^i(m, n) - W_j I^j(m, n)| \quad (1)$$

式中, G 为电网中所有发电节点的集合; L 为所有负

荷节点的集合; W_i 为发电节点 i 的发电有功功率; W_j 为负荷节点 j 的负荷有功功率; $I^i(m,n)$ 为发电机节点 i 单独注入单位电流元 e 时在支路 (m,n) 上引起的电流。

进一步发展了的电气介数指标相比于改进电气介数而言, 避免了不同发电容量和负荷水平情况下权重值可能相同的情况, 进一步完善了结构脆弱性的评估模型。根据式(1)计算每条线路电气介数 $B_e(m,n)$ 并进行排序, 值越大的线路在电网中越重要, 即为关键线路(脆弱线路)。高电气介数线路在电力系统中的地位比较重要, 对母线间的潮流传输有着重要的作用, 其出现故障退出运行时系统变得更为脆弱, 在潮流转移时更容易发生连锁故障事故。

基于系统线路电气介数指标 $B_e(m,n)$, 引入节点度的概念, 将与节点连接的所有线路的脆弱性指标进行加和, 并取模值, 得到考虑有功功率和无功功率的节点脆弱性评价指标:

$$\omega_{s_l-m} = \left| \sum_{k=1,2,\dots,n} B_{l_k} \right| \quad (2)$$

式中, B_{l_k} 为与节点 m 连接的线路 l_k 的线路脆弱性指标; n 为与节点 m 连接的线路总数。根据式(2)可计算每个节点的结构脆弱性指标并进行排序, 同理, 指标值越大的节点在电网中越重要, 该节点如果故障或退出运行对系统安全稳定性的影响更大。

2 状态脆弱性分析模型

状态脆弱性反映了电网元件实际运行状态距离临界值的裕度。本文基于短路容量的节点电压指标^[8]分析电网的状态脆弱性。

短路容量是指节点三相短路时的视在功率, 其大小等于短路电流与短路处的额定电压的乘积。短路容量反映电力系统某一供电点电气性能的一个特征量, 反映了该点带负荷的能力和运行电压稳定性。

首先对各负荷节点进行戴维南等值^[19-20](见图1), 由电路理论以及方程变换, 可以得到母线短路容量 SSC 与负荷母线电压的关系式以及负荷节点运行电压临界值^[8]:

$$\begin{cases} V_s = \left[-\frac{QE^2}{S_{sc}} + \frac{E^2}{2} + \sqrt{-\frac{P^2 E^4}{S_{sc}^2} + \frac{QE^4}{S_{sc}} + \frac{E^4}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ V_u = \left[-\frac{QE^2}{S_{sc}} + \frac{E^2}{2} - \sqrt{-\frac{P^2 E^4}{S_{sc}^2} - \frac{QE^4}{S_{sc}} + \frac{E^4}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

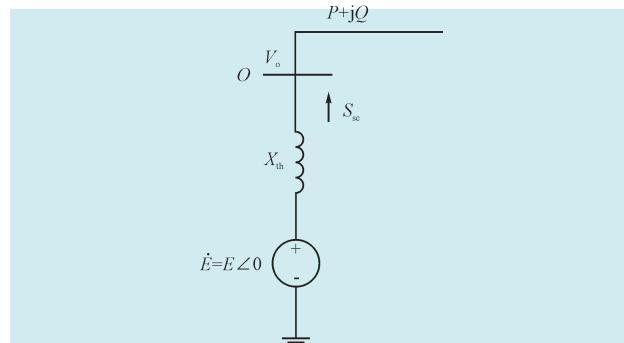


图1 负荷节点的戴维南等值电路

Fig. 1 Thevenin equivalent circuit of the load node

$$V_{cr} = \frac{E}{\sqrt{2(1+\cos\theta)}} \quad (4)$$

式中, V_s 为稳定解; V_u 为不稳定解; V_{cr} 为负荷节点的运行电压临界值。基于式(3)和式(4)得出负荷的节点电压稳定域 Y_i , 即节点的实际运行电压距离临界值的裕度:

$$Y_i = \frac{V_i - V_{cr}}{V_{cr}} \quad (5)$$

定义稳定域的倒数为节点的状态脆弱性指标:

$$\omega_i = \frac{1}{Y_i} = \frac{V_{cr}}{V_i - V_{cr}} \quad (6)$$

根据式(6)可以求出各负荷节点电压的脆弱性, 并进行排序。其中 V_i 为节点 i 的实际运行电压, 稳定域 Y_i 的值越大, 表示该负荷节点电压的运行状态越稳定; 反之, 则表示该负荷节点电压离临界电压越近, 运行状况越不稳定, 其状态脆弱性也越脆弱。

由式(6)可知, 当母线实际运行电压大于保持电压稳定的临界电压 V_{cr} 时, 负荷母线保持电压稳定, 电网供电满足负荷要求; 母线实际运行电压小于保持电压稳定的临界电压 V_{cr} 时, 负荷母线电压失稳; 母线实际运行电压小于保持电压稳定的临界电压 V_{cr} 时, 临界稳定, 电压的运行状态极为脆弱, 需采取无功补偿等措施加以改善。

3 电力系统脆弱性统一评价指标

电网脆弱性不仅与系统状态量有关, 又受到电网拓扑特征的影响。只考虑结构脆弱性的评估模型忽略了系统运行状态参数; 只考虑状态脆弱性的模型忽略了电力元件在网架结构中的地位, 两者都具有一定的缺陷。本文从节点脆弱度方面将结构脆弱指标和状态脆弱指标综合起来, 得到电力系统的综合脆弱性指标。

建立综合性指标之前,需要先以结构脆弱性指标和脆弱性指标的最大值为基准值,分别对结构脆弱性指标和状态脆弱性指标进行归一化处理,如式(7)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\omega}_{si} = \frac{\omega_{si}}{\omega_{si_max}} \\ \tilde{\omega}_{ni} = \frac{\omega_{ni}}{\omega_{si_max}} \end{array} \right. \quad (7)$$

其中, $\tilde{\omega}_{si}$ 、 $\tilde{\omega}_{ni}$ 分别为归一化之后节点*i*的结构脆弱性和状态脆弱性指标。由式(7)可知,0< $\tilde{\omega}_{si}\leq 1$,当 $\tilde{\omega}_{si}=\tilde{\omega}_{si_max}$ 时, $\tilde{\omega}_{si}=1$;与之类似,0< $\tilde{\omega}_{ni}\leq 1$,将归一化之后的结构脆弱性和状态脆弱性分别乘以权重并加和后得到综合脆弱性指标 λ_i 。

$$\lambda_i = \omega_1 \tilde{\omega}_{si} + \omega_2 \tilde{\omega}_{ni} \quad (8)$$

4 算例分析

选择IEEE-39节点系统作为分析算例,如图2所示。

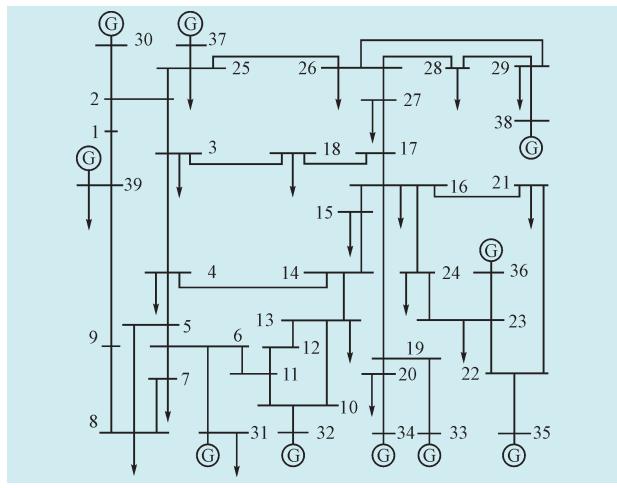


图2 IEEE-39节点系统接线图

Fig. 2 The configuration of the IEEE 39-node power system

对IEEE39节点系统中17个负荷节点分别进行结构脆弱性、状态脆弱性和综合脆弱性的计算,并按照综合脆弱性从大到小的顺序进行排列,排序结果如表1所示。

由表1可以看出,16节点的结构脆弱性指标最大,说明其在网架结构中的“重要程度”最高,该节点退出运行后对系统的安全稳定性带来的影响最大;27节点的状态脆弱性指标值最大,代表该节点的运行状态最逼近临界运行状态。此外,27节点还

表1 负荷节点综合脆弱性结果排序

Tab. 1 Ranking of load nodes' integrative vulnerabilities

负荷节点	结构脆弱性	状态脆弱性	综合脆弱性
27	0.650 7	1	0.825 35
20	0.607	0.819 1	0.713 05
16	1	0.410 7	0.705 35
21	0.645 6	0.670 1	0.657 85
24	0.592 8	0.617 9	0.605 35
12	0.776 1	0.222 9	0.499 5
29	0.595 8	0.390 9	0.493 35
25	0.617 4	0.354 1	0.485 75
26	0.585 2	0.354 1	0.469 65
23	0.618	0.319 9	0.468 95
8	0.753 7	0.140 2	0.446 95
15	0.745 2	0.145	0.445 1
28	0.616 4	0.197 8	0.407 1
4	0.771	0.041 15	0.406 075
3	0.689 5	0.098 9	0.394 2
18	0.646 2	0.117 7	0.381 95
7	0.683 5	0.037 3	0.360 4

是算例系统中综合脆弱性指标最大的节点,虽然该节点的结构脆弱性值在所有负荷节点中排第八位,但由于运行状态十分脆弱,因此其综合脆弱性排序上升至第一位,验证了元件在系统中脆弱性是由它在网架结构中重要性以及运行状态两部分共同决定。

5 结语

结构脆弱性是小世界电网本身固有的属性,外界影响因素不能从根本上改变这个弱点,合理安排电网的结构将更有助于增加电网的可靠性水平和稳定性水平。因此,结构脆弱性分析更多适用于电网的规划建设时期,有助于建立比较均匀的网架结构;另一方面,也期望结构脆弱性分析能适用于运行期:当改变系统的运行方式,电网拓扑发生变化时,重新评估网架的脆弱性得出新的薄弱环节。状态脆弱性监视电网的实际运行状态距离临界值的裕度,显而易见,其主要的价值在于电网的运行期。本文基于改进电气介数研究了电网的结构脆弱性评估模型,并基于短路容量研究了电网的状态脆弱性评估模型,在此基础上形成了电网脆弱性的统一评价指标,兼顾了元件在系统网架结构中

的重要性和运行状态,能较好地辨识电网中的薄弱环节,可为电网脆弱性评估及电网安全防御提供有效的决策依据,对电网的安全稳定运行具有重要的意义。

参考文献

- [1] 何大愚. 对美加大“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21):1-5.
HE Da-yu. Rethinking over ‘8.14’ us canada blackout[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5 (in Chinese).
- [2] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12).
CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12) (in Chinese).
- [3] 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 Xiu-li, WANG Xi-fan. Electric betweenness and its application in key line identification in power system[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39 (in Chinese).
- [4] 卢锦玲, 姬群星, 朱永利. 基于能量函数法的电网脆弱性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 30-33.
LU Jin-ling, JI Qun-xing, ZHU Yong-li. Power grid vulnerability assessment based on energy function[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 30-33 (in Chinese).
- [5] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 20-25.
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Riskbased vulnerability assessment in complex power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 12-17 (in Chinese).
- [6] 刘新东, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论和模糊推理的电力系统暂态安全风险评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 15-20.
LIU Xin-dong, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Transient security risk assessment of power system based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 15-20 (in Chinese).
- [7] 魏震波, 刘俊勇. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14.
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong. A new integrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 11-14 (in Chinese).
- [8] 邓桂平, 孙元章, 徐箭. 一种考虑母线短路容量的电压稳定解析方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 15-19.
DENG Gui-ping, SUN Yuan-zhang, XU Jian. A new voltage stability analysis method by considering short circuit capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 15-19 (in Chinese).

收稿日期:2012-12-28。

作者简介:

谢春瑰(1966—), 女, 从事电网规划、仿真分析和新能源接入工作;

方 菲(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

吕项羽(1981—), 男, 从事电网规划、仿真分析和新能源接入工作;

林 涛(1969—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、电能质量分析与控制;

蔡丽霞(1983—), 女, 从事电网规划、仿真分析和新能源接入工作;

刘 慧(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 冯露)