

# 基于电压稳定裕度的电网状态脆弱性评估方法研究\*

丁少倩<sup>1</sup> 林涛<sup>1</sup> 徐遐龄<sup>2</sup> 潘明森<sup>1</sup> 翟学<sup>1</sup> 方菲<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072; 2. 华中电力调控分中心, 武汉 430077;  
3. 国网天津市电力公司经济技术研究院, 天津 300010)

**摘要:** 随着智能电网的发展, 大规模互联电力系统的形成以及清洁能源发电系统接入负荷中心带来了不确定性因素, 更容易发生连锁故障。因此对于该类负荷节点的安全运行问题值得特别关注。电力系统脆弱性一直是智能电网的研究热点课题之一, 针对上述问题, 提出了一种基于电压稳定裕度的含电源的负荷节点评估模型及指标, 即通过比较节点实际的运行电压和临界电压之间的裕度的临界电压指标来评估有电源接入情况下的负荷节点的状态脆弱性, 使状态脆弱性体系的评估更加完善。并以未归一化的状态脆弱性指标为基础, 建立电网状态脆弱性评估模型, 研究电源接入电网的最优接入位置。最后通过 IEEE-39 节点仿真算例, 充分证明了该评价方法的合理性与有效性, 从而为电网的合理规划和调度运行提供了理论依据。

**关键词:** 电力系统; 状态脆弱性; 电压安全裕度; 临界电压; 新能源

中图分类号: TM721

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2016)09-0062-05

## Research on vulnerability assessment method of grid state based on voltage security margin

Ding Shaoqian<sup>1</sup>, Lin Tao<sup>1</sup>, Xu Xialing<sup>2</sup>, Pan Mingsen<sup>1</sup>, Zhai Xue<sup>1</sup>, Fang Fei<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China.

2. Central China Electric Power Dispatch & Communication Center, Wuhan 430077, China.

3. Tianjin Electric Power Company and Economic Institute of Technology, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** With the development of smart grid construction and operation, the appearance of clean energy power generation system access to load center and the formation of the regional interconnected power grid has increased the probability of power failure in large areas, so the secure operation of load nodes deserves special attention. In this paper, it puts forward the state vulnerability assessment model and index based on the voltage stability margin, considering the power access to load node, which makes the state vulnerability assessment system perfect. Based on state vulnerability index results, the state assessment model of grid is established to judge the optimal access. Finally, simulation examples on IEEE-39 node system illustrate that the algorithm is effective and practical. In this way, a theoretical reference is provided for the further study on reasonable planning of power network, as well as its dispatching.

**Keywords:** power system, state vulnerability, voltage security margin, critical voltage, new energy power

### 0 引言

近年来, 新能源发展迅猛, 其中我国风电发展呈现出了大规模集中开发的特征, 并通过超高压线路输送到负荷中心, 其应用已得到世界各国的广泛关注。然而, 由于其随机性和间歇性, 给电网的安全运行带来了很大的不确定性, 造成停电事故频频发

生<sup>[1-3]</sup>。对于该类负荷节点的安全运行问题值得特别关注。脆弱性是近年来智能电网的研究热点之一, 状态脆弱性评估是从系统运行状态的角度来评估电力系统脆弱性, 它不但可以对可能存在的薄弱环节及时提出合理有效的改进措施, 而且可以为电网的安全稳定运行以及早期预警提供有价值的参考。

针对状态脆弱性的研究方法主要有能量函数法

\* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51177111)

和基于概率论和风险理论的评估分析方法。文献[4-6]从能量函数的角度来评估状态脆弱性,虽然计算量相对较小,但是模型简单,所得结果不太精确;文献[7-8]定义概率模型和风险指标对电力系统脆弱性进行定量评估,但电力系统的风险指标往往是随着运行状态的变化而变化的,风险评估不能反映这种情况。这些方法主要适用于电网发生故障的情况,需进一步完善。文献[9]虽然基于临界电压指标来评估负荷节点的状态脆弱性,但没有考虑到有电源接入的情况。

基于电压稳定裕度研究了有电源接入情况下的负荷节点的状态脆弱性评估模型及指标,即通过比较节点实际的运行电压和临界电压之间的裕度的临界电压指标来评估负荷节点的状态脆弱性;有效地分析运行状态对电网脆弱性的影响。并以未归一化的状态脆弱性指标为基础,建立电网状态脆弱性评估模型,研究电源接入电网的最优接入位置。通过IEEE-39节点算例验证了该评价方法的合理性与有效性。

## 1 负荷节点状态脆弱性评估模型

本文引入电压稳定裕度的概念,采用基于电压稳定裕度指标来分析有电源接入情况下的负荷节点的状态脆弱性。

### 1.1 负荷节点状态脆弱性评估模型及指标

基于系统计算或观测潮流数据对待测负荷节点进行戴维南等效,只有被评估的负荷节点保留,系统的其余部分用电压源和阻抗代替,等效后的电网模型为2节点系统<sup>[10]</sup>。而如果所待测节点包含新接入的电源时,则等效后的电网络模型为图1所示的3节点系统。

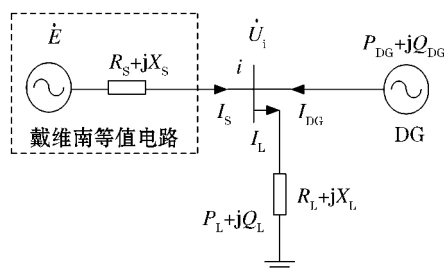


图1 接入电源的电网戴维南等值系统

Fig. 1 The venin equivalent system of the load node access to a generator

在图1中,戴维南等值电势为  $\dot{E}$  相角为0,戴维南等值阻抗为  $Z_s \angle \theta = R_s + jX_s$ ,  $U_i$ 、 $\theta$  为负荷节点的电压幅值和相角;负荷功率为  $\dot{S} = P_L + jQ_L$ ,新接入电

源的有功和无功分别为  $P_{DG}$ 、 $Q_{DG}$ 。

由图1可知,负荷节点的复功率可表示为:

$$\begin{aligned} P_L + jQ_L &= \dot{U}_L \frac{\dot{E}^* - \dot{U}_L^*}{R_s - jX_s} + (P_{DG} + jQ_{DG}) \\ &= (U_L \cos\theta + jU_L \sin\theta) \cdot \\ &\quad \left[ \frac{E - U_L \cos\theta + jU_L \sin\theta}{R_s - jX_s} \right] + (P_{DG} + jQ_{DG}) \quad (1) \end{aligned}$$

由于在稳定性临界点时,电压存在唯一解:

$$U_{C-i} = \sqrt{E^2/2 - (P_L - P_{DG})R_s - (Q_L - Q_{DG})X_s} \quad (2)$$

当负荷节点不包含DG时,由式(2)可知,即  $P_{DG} = 0$ ,  $Q_{DG} = 0$  存在:

$$U_{C-i} = \sqrt{E^2/2 - P_LR_s - Q_LX_s} \quad (3)$$

因此,定义电压稳定性指标:

$$\omega_{ri\_load} = \frac{U_{C-i}}{U_i - U_{C-i}} \quad (4)$$

式中  $U_i$  为负荷节点  $i$  的运行电压,  $U_{C-i}$  为负荷节点  $i$  的临界电压,状态脆弱性指标  $\omega_{ri\_load}$  越大,代表运行电压越接近于临界电压,该负荷节点的状态脆弱性越脆弱,运行状态越不稳定。反之,说明该负荷节点的运行状态越稳定。

### 1.2 状态脆弱性指标归一化

为了使状态脆弱性指标更加清晰明了,需要将负荷节点指标的计算结果归一化,即:

$$\tilde{\omega}_{ri\_load} = \frac{\omega_{ri\_load} - \omega_{ri\_load\_min}}{\omega_{ri\_load\_max} - \omega_{ri\_load\_min}} \quad (5)$$

式中  $\omega_{ri\_load\_max}$ 、 $\omega_{ri\_load\_min}$  分别为所有负荷节点状态脆弱性指标的最大值和最小值,  $\tilde{\omega}_{ri\_load}$  为归一化后负荷节点  $i$  的状态脆弱性指标。

状态脆弱性指标  $\tilde{\omega}_{ri\_load}$  都介于0和1之间,即  $0 < \tilde{\omega}_{ri\_load} \leq 1$ ,当  $\omega_{ri\_load} = \omega_{ri\_load\_max}$  时,  $\tilde{\omega}_{ri\_load} = 1$ 。

当  $\tilde{\omega}_{ri\_load}$  越接近于1,代表该负荷节点的运行状态越接近临界稳定状态,运行状态越不稳定,反之,当  $\tilde{\omega}_{ri\_load}$  越接近于0,说明该负荷节点的运行状态越稳定。

## 2 电网状态脆弱性评估模型

电源网中有新的电源接入时,线路潮流方向和大小将受到新的电源接入位置等因素的影响<sup>[11]</sup>。电源最优接入位置是在满足线路电压、电流等基本要求的的前提下,假设有一电源接入负荷节点来优化电网运行,从而达到对整个电网脆弱性影响最小,提高系统稳定性的目的。以1.1节阐述的负荷节点的状态脆弱性理论为基

基础,从系统运行状态角度反映了电网的运行状态下电网脆弱性的强弱。因此,结合电源接入不同负荷节点的运行模式,以未归一化的状态脆弱性指标为基础,建立电网状态脆弱性评估模型,即:

$$ISV = \sum_{i \in node} \omega_{ri\_load} = \sum_{i \in node} \frac{U_{C\_i}}{U_i - U_{C\_i}} \quad (6)$$

式中  $ISV$  为电网状态脆弱性。 $\omega_{ri\_load}$  为节点  $i$  未归一化的状态脆弱性指标,为电网中的负荷节点。

$$\min ISV = f(X_i) \quad (7)$$

式中  $X_i$  为电网中电源接入负荷节点的位置。

电网状态脆弱性  $ISV$  越小,说明电源的接入对电网中节点电压的引起的波动越小。当电网状态脆弱性  $ISV$  取得最小值时,电源接入的负荷节点即为电源最优接入位置。

3 实验结果与分析

选取 39 节点系统算例<sup>[12]</sup>作为研究算例,其结构接线图如图 2 所示。

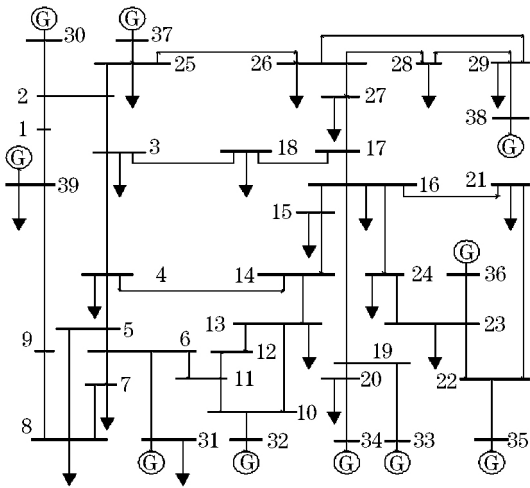


图 2 IEEE-39 节点系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of IEEE-39 node system

3.1 负荷节点状态脆弱性验证

3.1.1 基于电压稳定裕度指标的状态脆弱性评估

当负荷节点 4 接入  $P_{DG} = 1.5$   $Q_{DG} = 0.2$  (均为标么值) 的电源时,由公式(1)~公式(5),基于临界电压指标的来计算负荷节点的状态脆弱性指标降序排序,如表 1 所示。

从表 1 中的数值分布可以看出,节点 15 的归一化状态脆弱性指标为 0.427 37,要远小于其他节点,其负荷节点的稳定裕度最大,按照上文的理论分析来看,其负荷节点运行状态最好。

节点 12 和节点 28 是的归一化状态脆弱性指标分别是 1 和 0.844 24 相对较大,意味着其负荷节点

表 1 含电源时的前 6 名负荷节点状态脆弱性指标排序

Tab. 1 Top six state vulnerability indexes sorting of load nodes including generator

排序	负荷节点	$U_i$	$U_{C\_i}$	$\omega_{ri}$	$\tilde{\omega}_{ri}$
1	12	1.011 32	0.717 55	2.442 60	1.000 00
2	28	1.056 83	0.711 70	2.062 13	0.844 24
3	26	1.059 72	0.685 99	1.834 97	0.751 24
4	8	1.012 16	0.611 27	1.524 76	0.624 24
5	7	1.012 72	0.523 87	1.171 64	0.438 73
6	15	1.032 46	0.557 27	1.143 66	0.427 37

的电压稳定裕度较小,其负荷节点较为脆弱。

3.1.2 仿真验证

为了验证负荷节点状态脆弱性评估方法在实际算例电网中的实用性和有效性,选择目标节点以  $0.25 + j0.25$  (标么值) 为步长逐渐增大节点负荷功率,直至负荷功率增量为  $2.25 + j2.25$  时,分析负荷节点电压变化情况,进一步分析该负荷节点带负荷的能力。

设负荷节点的运行点电压为  $V_i$ ,其电压跌落至为  $V'_i$ ,比较节点相同时间内的电压跌落率  $\lambda_i$ ,即:

$$\lambda_i = \frac{V_i - V'_i}{V_i} = \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (8)$$

将指标  $\lambda_i$  做归一化处理,得到电压跌落率归一化指标  $\bar{\lambda}_i$ ,方法与 1.2 节中相同。负荷节点电压的跌落情况如图 3 所示。通过计算,得到电源节点状态脆弱性评价指标如表 2 所示。其中节点 15 的状态脆弱性指标为 0.390 75 相对较小,节点 12 的状态脆弱性指标为 1,指标数值最大。

表 1 和表 2 的所得的负荷节点的状态脆弱性数据进行对比,如图 4 所示,实线为本文所述的临界电压指标所得的负荷节点的状态脆弱性指标,虚折线为基于负荷增长的电压跌落验证指标。由图 4 可知,两者结果基本一致,证明了本文所述方法的准确性。

电压跌落率的计算基于连续潮流法,计算量大,只

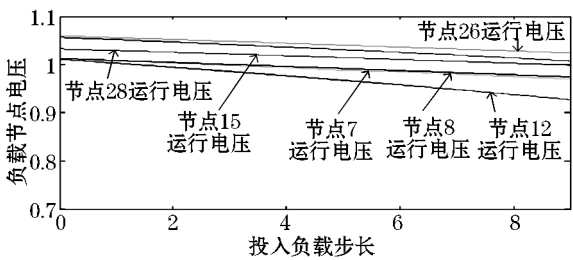


图 3 负荷节点电压的跌落情况

Fig. 3 Voltage drop conditions of lode nodes

表 2 基于负荷增长的负荷节点电压跌落率排序

Tab. 2 Sort of voltage drop rate of load nodes based on the load growth

排序	负荷节点	$V_i$	$V'_i$	$\lambda_i$	$\tilde{\lambda}_i$
1	12	1.011 32	0.927 33	0.083 05	1.000 00
2	28	1.056 83	1.007 74	0.046 44	0.559 23
3	26	1.059 83	1.023 85	0.033 95	0.408 81
4	7	1.012 72	0.974 05	0.038 18	0.459 70
5	8	1.012 16	0.970 02	0.037 68	0.453 75
6	15	1.025 67	0.995 41	0.032 45	0.390 75

能离线计算且不能计及电网发生故障的情况,而本文所述的方法没有局限性,计算方法简单,有在线评估的应用前景,在状态脆弱性评估上有一定的优越性。

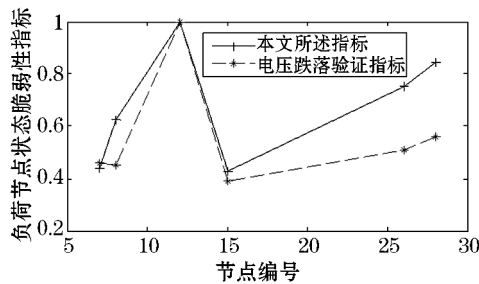


图 4 负荷节点结果对比

Fig. 4 Chart of comparison of results of load nodes

3.2 电源接入前后的状态脆弱性排序对比分析

当负荷节点 4 未接入的电源时,基于电压稳定裕度指标,由公式(1)~公式(4),计算如表 3 所示。

表 3 未接入电源时的前 6 名负荷节点  
状态脆弱性指标排序

Tab. 3 Top six state vulnerability indexes sorting of load nodes excluding generator

排序	负荷节点	$U_i$	$U_{C-i}$	$\omega_{ii}$	$\tilde{\omega}_{ii}$
1	12	1.009 89	0.702 36	2.283 90	1.000 00
2	15	0.982 32	0.548 02	1.647 27	0.721 26
3	28	1.057 41	0.654 21	1.622 56	0.710 43
4	4	1.012 42	0.621 26	1.588 24	0.695 41
5	8	1.005 95	0.608 79	1.532 84	0.671 15
6	7	1.003 29	0.554 63	1.236 19	0.541 26

由表 1 和表 3 对比可知,新电源接入前后,电网中负荷节点的状态脆弱性排序有所不同,在新电源的接入前,节点 12 和节点 15 的状态脆弱性相对较大。在电源接入后,节点 12 和节点 28 的状态脆弱性

相对较大。

负荷节点 4 在电源接入前,其状态脆弱性相对较大,排名第 4。在电源接入后,经计算可知,节点 4 电压稳定裕度增大,其状态脆弱性由 1.588 2 降低到 1.141 32,排名第 8,由此证明电源的接入,改善了节点 4 的状态脆弱性。

这是因为电源的接入,使得潮流发生转移,继而影响系统电压的波动,其状态脆弱性也有所不同。当节点 4 接入电源后,该电源有无功出力,为节点 4 提供无功支撑,其电压稳定性得到改善,运行状态比较稳定,状态脆弱性变小;因节点 15 距离节点 4 较近,进而使节点 15 的带负荷能力也增强,状态脆弱性降低。

3.3 电源的最优接入位置分析

将  $P_{DG}=1.5$   $Q_{DG}=0.2$  (均为标么值) 的电源接入不同负荷节点,由式(6)~式(7)计算电网的状态脆弱性,其结果如图 5 所示。

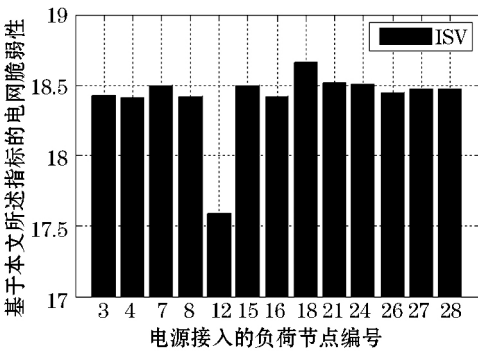


图 5 电网状态脆弱性结果对比

Fig. 5 Results contrast of state vulnerability of grid

由图 7 可知,将电源以相同的出力接入负荷节点的结果进行对比,当电源接入负荷节点 12 时,电网状态脆弱性 ISV 的值为 17.588 2 最小;接入负荷节点 4 时,ISV 的值为 18.413 6,次之。综上,电源接入节点 12 为电源最优接入位置。

4 结束语

文中考虑了有电源接入负荷节点的情况,提出了一种基于电压稳定裕度的负荷节点的状态脆弱性评估方法及指标,完善了状态脆弱性评估体系。并以未归一化的状态脆弱性指标为基础,建立电网状态脆弱性评估模型,研究分析了电源接入电网后的最优接入位置。从电压稳定裕度的角度出发,评 IEEE-39 估节点抵御连锁故障或连锁扰动的能力。并通过 IEEE-39 节点系统仿真,验证了本文方法的合理性与有效性。

基于电压稳定裕度指标的状态脆弱性指标物理

概念清晰,计算方法简单,反映了电力系统的核心本质,可以适用于电网发生故障的情况;既可离线应用,又有在线应用前景。而连续潮流算法模型存在的局限性使得连续潮流计算方法不能适用于计及保护作用 and 故障操作,无法讨论不同事故下节点的脆弱性研究,其应用存在局限性。

进一步地,可结合节点的结构脆弱性,来全面评估节点的综合脆弱性,防范电网连锁故障的发生。

### 参考文献

- [1] 高翔,庄侃沁,孙勇. 西电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术,2007,31(1): 25-31.  
Gao Xiang, Zhuang Kanqin, Sun Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.
- [2] Hines P, Balasubramaniam K, Sanchez E C, et al. Cascading failures in power grids[J]. IEEE Potentials, 2009, 28(5): 24-30.
- [3] 廉超. 分布式发电并网运行优化配置方法的研究[D]. 华北电力大学, 2008.  
Liao Chao. Research on the optimal allocation method of connecting distributed generation into the grid[D]. North China Electric Power University, 2008.
- [4] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 29-36.  
Liu Qunying, Liu Junyong, Liu Qifang. Reactive power margin estimation by the view of the heuristic energy function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 29-36.
- [5] 苟竟,刘俊勇,刘友波. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2754-2761.  
Gou Jing, Liu Junyong, Liu Youbo. Energy entropy measure based risk identification of power system cascading failures[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2754-2761.
- [6] 孔祥玉,赵帅,房大中. 能量函数方法在大电网追加紧急控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 36(1): 8-12.  
Kong Xiangyu, Zhao Shuai, Fang Dazhong. Append emergency control strategy based on energy function method in large power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 36(1): 8-12.
- [7] 吴文可,文福拴,薛禹胜. 基于马尔可夫链的电力系统连锁故障预测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 29-37.  
Wu Wenke, Wen Fushuan, Xue Yusheng. Cascading failure propagation mechanism based on Markov chain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 29-37.
- [8] 贺强,李华强,郑国,等. 基于运行可靠性和结构重要度的连锁故障预测[J]. 电测与仪表, 2015, 52(1): 47-52.  
He Qiang, Li Huaqiang, Zheng Guo. Cascading failure forecasting based on operational reliability and structural importance [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(1): 47-52.
- [9] 谢春瑰,方菲,吕项羽,等. 电网脆弱性评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 19(5): 35-38.  
Xie Chungui, Fang Fei, Lv Xiangyu, et al. Research on power grid vulnerability assessment methods[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 19(5): 35-38.
- [10] 赵晋泉,杨友栋,高宗和. 基于局部相量测量的电压稳定评估方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 1-6.  
Zhao Jinquan, Yang Youdong, Gao Zonghe. A review on on-line voltage stability monitoring indices and methods based on local phase measurement[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(20): 1-6.
- [11] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 53-58.  
Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi. Study on location and penetration of distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2005, 17(1): 53-58.
- [12] 王剑,张壬寅,张蕾. 基于等效电气距离的电压稳定性指标计算[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(6): 130-134.  
Wang Jian, Zhang Renyin, Zhang Lei. Voltage stability index based on equivalent electrical distance[J]. Journal of Shandong University, 2009, 39(6): 130-134.

### 作者简介:



丁少倩(1988—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。Email: dingshaoqian1@163.com

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、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制。Email: tlin@whu.edu.cn

收稿日期:2015-03-30; 修回日期:2015-06-08

(王克祥 编发)