

风电接入对电力系统节点脆弱性的影响分析

申永涛, 刘宗歧, 刘文霞, 吴旭, 徐继凯

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

Impact of Wind Power Integration on Power System Node Vulnerability

SHEN Yongtao, LIU Zongqi, LIU Wenxia, WU Xu, XU Jikai

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

摘要:从电力系统脆弱性方面,对风电并网前后节点的脆弱性进行了比较分析。文中主要考虑电力系统脆弱性的两个方面:状态脆弱性方面主要利用改进的非线性保留算法求取节点临界电压,进而计算节点状态脆弱性指标;结构脆弱性方面是基于复杂网络理论对节点重要度进行评估;结合这两个方面构造综合脆弱度函数;本文对风电并网的潮流计算做了简单的分析介绍。最后以IEEE14节点系统为例,利用本文所提的方法,以某条线路断线作为扰动,计算了风电并网前后、不同的风电并网点以及同一并网点不同风速下的节点脆弱度,并对结果进行了分析。

关键词:状态脆弱性;结构脆弱性;综合脆弱度;风电并网;潮流

Abstract: In this paper, the node vulnerability of system with and without the wind farm is compared and analyzed. Two aspects of the vulnerability are mainly considered, one is to solve node critical voltage by using of improved nonlinear flow algorithm, then to calculate the state vulnerability of bus; another one is to calculate the structure vulnerability by assessing the node importance based on the complex network theory. Then a comprehensive vulnerability function is built by combing above two aspects and the power flow of power grid with wind farm is introduced simply. In the end, by taking IEEE14-bus system as example, the node vulnerability under different conditions is calculated by proposed method with the disturbance of line tripping.

Keywords: state vulnerability; structure vulnerability; integrated vulnerability; wind power integration; power flow

0 引言

电力系统脆弱性是从宏观的角度诠释电网的安

全稳定,是用来描述系统在正常运行情况或各种随机因素的作用下,系统承受干扰或故障的能力及系统不能维持正常运行的可能趋势及影响。随着风电的大规模接入电网,考虑到风电场的运行特性,风电并网势必影响电力系统各节点的运行状态,同时风电并网后电网结构越趋复杂,系统节点的结构特性也会受到影响。

目前,许多专家学者已经从不同方面对风电并网做了很深入的研究^[1-5],同时也有很多学者对电力系统的脆弱性方面做了比较细致的研究^[6-8]。但是目前的研究有的仅仅围绕风电场与电力系统可靠性方面进行研究,并没有针对风电接入对电力系统脆弱性的影响进行分析^[1-5];有的文献对电网的脆弱性进行评估,但是却没有考虑到风电的接入^[6-7];而有的文献虽然考虑了风电接入,但是在脆弱性方面却考虑的不够全面^[8]。

针对研究现状以及上述问题,本文在介绍了电力系统脆弱性的基础上,结合状态脆弱性、结构脆弱性两方面,提出了对含风电场电力系统的负荷节点的脆弱度评估方法。最后以IEEE14节点系统为算例,以某条线路断线作为扰动,计算了风电并网前后、不同的风电并网点以及同一并网点不同风速下的电力系统节点脆弱度,并对风电并网前后各节点的脆弱度进行分析。利用本文所提方法,可以找出电网的脆弱节点,为电网规划以及安全运行提供参考依据。

1 电力系统脆弱性分析和计算

电网脆弱性分析是指从电网的整体结构和性能角度出发,研究分析在系统故障时网络性能的决定性因素。电网的脆弱性分析是一项系统性的工作,

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)
(2012AA050201)

会涉及到电力系统的各个方面,目前主要是从电力系统的运行状态和电力系统的网架结构,也即状态脆弱性和结构脆弱性两方面展开。

1.1 状态脆弱性

状态脆弱性是从稳定和安全等运行角度进行的脆弱性分析,主要关注系统受到干扰时的稳定性、电网安全约束的满足情况等。目前状态脆弱性指标的构造方法还未统一,但是其一般思想都可以概括为以下几个数学表达式:

$$\begin{cases} \Delta = |\mu(t) - \mu_{\text{临界}}| \\ \rho = \frac{|\mu(t) - \mu_{\text{临界}}|}{|\mu_0 - \mu_{\text{临界}}|} \\ \sigma = \frac{\partial \Delta \mu}{\partial t} \left| \frac{\partial \Delta f}{\partial t} \right|^{-1} = \frac{\partial \Delta \mu}{\partial \Delta f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mu(t)$ 表示状态量的当前值; $\mu_{\text{临界}}$ 表示的是临界值; Δ 表示状态量当前值与临界值之间的绝对裕度差额; μ_0 表示状态量给定的初始值; ρ 表示的是相对脆弱度; Δf 表示系统状态量变化值^[9](在文献^[9]中, Δf 取的是有功功率); σ 代表灵敏度脆弱度,表示状态量与参考量之间的变化关系。

从表达式中可以看出,绝对脆弱度表征了电网发生扰动或故障时,电网状态量的变化量,但是不同条件下,表征的脆弱度很有可能不同;而指标 ρ 和 σ 则利用比值和微分的形式很好地弥补了绝对脆弱度的缺点。

鉴于这方面的考虑,本文的状态脆弱性指标拟利用相对脆弱度指标进行计算,计算公式:

$$S_i = \frac{1}{\rho_i} = \left| \frac{U_{i0} - U_{\text{cri}}}{U_i(t) - U_{\text{cri}}} \right| \quad (2)$$

式中: $U_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的电压; U_{cri} 表示节点 i 的临界电压值; U_{i0} 表示节点 i 的初始电压值。

在计算节点相对脆弱度指标的时候,其中的关键便是计算节点的临界电压。计算临界电压值的速度和精度将对电压裕度的求取速度和精度具有决定性的影响,因此计算临界电压需要寻求相对快速和准确的算法^[10]。本文采用文献^[11]中的改进的非线性保留算法(PNFA)算法,对临界电压进行求取。

1.2 结构脆弱性

结构脆弱性是指电力系统正常运行情况下,保持其拓扑结构完整性的能力。它是从电网自身的拓扑结构寻找电网自身固有的脆弱性。结构特性是电网固有的属性,一旦网络结构确定,外界的影响因素不能从根本上改变这个弱点^[12]。目前在结构脆

弱性的研究大多都是以复杂网络理论为基础,通过求取网络的平均路径长度(L)、聚类系数(C)、度的分布、介数(B)、网络冗余性(R)等结构指标,进而判断节点或边的脆弱性。本文根据复杂网络理论,采用节点收缩后网络凝聚度对各个节点的重要度进行评估^[13]。

节点收缩(即将节点 v_i 收缩)是指将与节点 v_i 相连接的 k_i 个节点都与 v_i 融合,即用一个新节点代替这些节点,原先与它们关联的边现在都与新的节点关联。此方法可以用一个简单的例子描述,如图 1 所示。

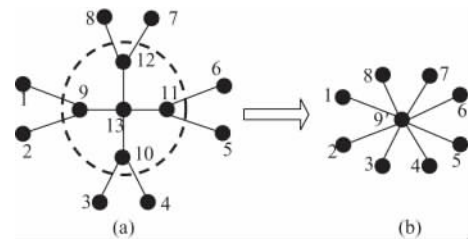


图 1 节点收缩法基本原理

在图 1(a)原网络中,选择节点 13 为待收缩节点。将节点 13 收缩是指将与其相连接的节点 9、10、11、12 短接,并以图 1(b)中的新节点 9'代替。在图 1(a)中与节点 9、10、11、12 相关联的边在图 1(b)中均与新节点 9'关联。根据节点收缩法,可得节点重要度定义^[14]如下:

$$\begin{cases} \partial(G) = 1/nl \\ l = \sum_{i,j \in V} d_{\min,ij} / (2n(n-1)) \\ \alpha = 1 - \frac{\partial(G)}{\partial(G \times v_i)} = \frac{n \times l(G) - (n - k_i) \times l(G \times v_i)}{n \times l(G)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 为节点重要度; n 为网络中的节点数目; l 为节点之间的平均最短路径($d_{\min,ij}$ 是用边的数目表示的网络中任意两节点 v_i 和 v_j 之间的最短距离, V 是网络中所有节点组成的集合); k_i 为节点的连接度,即与节点 v_i 相连的节点的个数; G 为原网络对应的图; $G \times v_i$ 为节点 v_i 收缩后的所得到的图。从式(3)可以看出,节点重要度 α 主要取决于节点连接度和节点在网络中的位置,如果节点 v_i 的连接度 k_i 越大,则将该节点收缩以后网络中节点的数目就越少,网络的凝聚度就越大,该节点越重要。

1.3 综合脆弱度的计算

为更合理地反映节点的脆弱度,本文将节点的

状态脆弱性和结构脆弱性二者结合起来,综合考虑了脆弱性分析中的两个方面。本文构造的节点综合脆弱度函数如式(4)所示:

$$V_i = S_i \times \alpha_i \quad (4)$$

2 含风电场的潮流计算

2.1 风电机组模型

风电机组是实现风能到电能转换的设备。风电机组的发电能力与风速直接相关。风电机组输出功率 P_w 与风速 v 之间的函数关系可近似描述为^[15]

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ k_1 v + k_2, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $k_1 = P_r / (v_r - v_{ci})$; $k_2 = -k_1 v_{ci}$; P_r 为风电机组额定容量; v_r 、 v_{ci} 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

本文用笼型异步风机对风机模型进行介绍,笼型异步风力发电机简化后的等效电路如图 2 所示^[15]。图中: x_s 为定子漏抗; x_r 为转子漏抗; R_r 为转子电阻; s 为转差率; x_m 为励磁电抗。

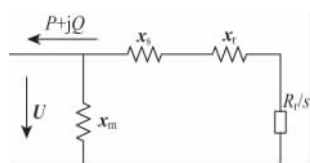


图 2 笼型异步发电机等效电路

由图 2 可推出

$$U = \sqrt{-P(s^2(x_s + x_r)^2 + R_r^2)/R_r s} \quad (6)$$

$$Q = -\left(\frac{U^2}{x_m} + \frac{Px}{R_r s}\right) \quad (7)$$

$$s = -\frac{R_r(U^2 - \sqrt{U^4 - 4(x_s + x_r)^2 P^2})}{2P(x_s + x_r)^2} \quad (8)$$

$$Z = jx_m // \left(\frac{R_r}{s} + j(x_s + x_r)\right) \quad (9)$$

式(9)中: Z 表示风力发电机的等效电抗。

2.2 含风电场潮流计算

风电场是由很多分散布置的风电机组组成的,本文在风电场建模方面,将风电场作为一个整体,等效成一台机组接入电网,计算风电场输出功率时,未考虑机组所处地形、尾流效应等因素的影响。本文采用 P - Q 迭代模型进行并网后的潮流计算^[16],根据给定的风速,利用式(5)确定风电场输出的有功功率,迭代算法过程如下:

① 给出初始电压 U_0 ;

② 由式(8)求解初始转差 s_0 ;

③ 利用式(7)计算无功功率 Q ,然后把节点看做 P - Q 节点进行潮流计算,求解电压 U ;

④ 当电压差值(U_0 与 U')小于给定的值,计算结束,否则更新 U ,返回②)。

3 节点脆弱度的计算流程

由脆弱性知识可知,节点脆弱度的计算包括两部分:一是节点的状态脆弱度的计算,二是节点的重要度计算。在第 2 部分里,对于确定的网络,各节点的重要度一致,所以只要确定风电并网前的网络邻接矩阵以及风电并网后的邻接矩阵,再调用基于节点收缩的节点重要度评估函数,即可求得对应情况的节点重要度;而第 1 部分的状态脆弱度的计算,则需要计算风电并网前各节点的临界电压、并网前各节点的运行稳态电压、并网前断线故障后各节点的电压以及并网后各节点的对应状态。计算流程如图 3 所示。

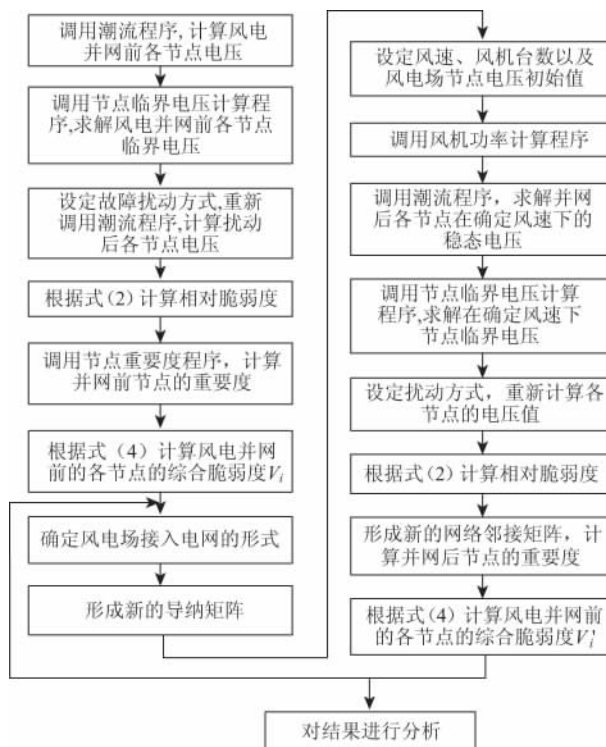


图 3 含风电场电力系统节点脆弱度计算流程

4 算例分析

本文以 IEEE14 节点的系统为例,对其负荷节点脆弱度进行评估。风电机组采用 NORDEX S70,

单机容量为 1.5MW, 出口电压 690V, 设置的风机台数为 50 台, 切入风速 3.5m/s, 切除风速 25m/s, 额定风速为 13m/s, 风电机组等效后的参数(标么值): $x_s = 0.171$, $x_r = 0.103$, $x_m = 2.9$, $R_r = 0.00706$ 。IEEE14 节点系统图如图 4 所示。

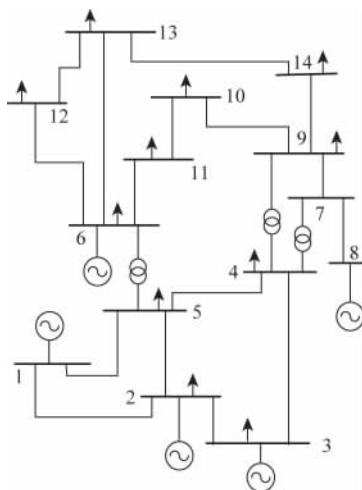


图 4 IEEE14 节点系统图

扰动源选为线路 2-3 断线, 针对风电并网前后、风电并网点以及同一并网点不同风速下的几种情况, 其中风电并网前后的负荷水平保持不变, 通过 MATLAB 编程, 对电力系统节点脆弱度分别计算。各负荷节点临界电压计算结果如表 1 所示。

表 1 各节点临界电压(标么值)

节点	并网前	并网于节点 14		并网于节点 10($v=10\text{m/s}$)
		$v=10\text{m/s}$	$v=13\text{m/s}$	
4	0.806	0.865 5	0.903	0.865 2
5	0.833	0.881 5	0.935	0.880 4
7	0.729	0.785 5	0.852	0.784 5
9	0.662	0.713 5	0.783	0.711 3
10	0.647	0.701 5	0.775	0.720 0
11	0.667	0.721 5	0.793	0.720 5
12	0.660	0.711 5	0.783	0.710 2
13	0.644	0.693 5	0.767	0.680 3
14	0.590	0.640 5	0.677	0.640 7

由表中数据可以看出, 风电场并网后, 系统临界电压普遍提高, 这主要是因为风速越大, 风电场吸收的无功越多, 而无功与电压密切相关, 进而各个节点的临界电压值有不同程度的提高。尤其是风电场附近的节点电压变化幅度较大, 这就要求在实际的风电场并网运行过程中, 有必要在并网点及对风电场较为敏感的节点进行无功补偿, 以保证含风电系统的安全稳定运行。

通过仿真可得, 风电场并网前后, 各节点的状态脆弱性和结构脆弱性计算结果如表 2 所示。

表 2 并网前后各节点状态和结构脆弱性计算结果

节点	并网前		并网于节点 10($v=10\text{m/s}$)		并网于节点 14($v=10\text{m/s}$)		并网于节点 14($v=13\text{m/s}$)	
	状态	结构	状态	结构	状态	结构	状态	结构
4	1.026 042	0.998 765	1.034 442	0.981 000	1.028 369	0.981 000	1.044 195	0.990 909
5	1.025 145	0.897 606	1.032 602	0.879 032	1.027 097	0.879 032	1.049 571	0.886 179
7	1.007 546	0.808 190	1.009 061	0.810 135	1.007 852	0.810 135	1.011 996	0.815 646
9	1.005 845	0.969 828	1.000 866	0.989 764	1.005 963	1.000 000	1.008 434	0.996 345
10	1.004 919	0.674 021	1.005 692	0.783 660	1.004 775	0.783 660	1.006 815	0.684 817
11	1.002 545	0.674 025	1.002 946	0.707 027	1.002 481	0.707 027	1.003 745	0.684 817
12	1.000 497	0.674 023	1.000 567	0.684 817	1.000 505	0.684 817	1.000 715	0.681 250
13	1.000 720	0.808 190	1.000 789	0.784 040	1.000 727	0.794 040	1.001 022	0.821 233
14	1.003 042	0.716 146	1.003 418	0.718 681	1.003 075	0.718 681	1.003 748	0.832 639

从表 2 中数据可以看出, 并网前后, 各节点的状态与结构脆弱性的计算指标值以及排序结果都发生了变化, 这主要是因为风电场并网后改变了系统的运行方式, 并且影响了网架的拓扑结构, 而且并网节点的不同对两方面也都有不同程度的影响。

根据公式 (4) 以及表 2 中的数据, 对各节点并网前后综合脆弱度进行计算, 结果如表 3 所示。

从表 3 可看出, 在同一风速下, 并网节点不同的情况下, 节点的脆弱度值发生了变化, 而且排序结果也发生了部分改变, 这说明了不同的并网节点

表 3 并网前后各节点综合脆弱度计算结果

节点	并网前	并网于节点 10 ($v=10\text{m/s}$)	并网于节点 14	
			$v=10\text{m/s}$	$v=13\text{m/s}$
4	1.026 042	1.014 788	1.008 830	1.034 702
5	0.920 177	0.907 690	0.902 852	0.930 108
7	0.814 288	0.817 476	0.816 496	0.825 431
9	0.975 496	1.000 866	1.005 963	1.008 434
10	0.677 335	0.788 121	0.787 402	0.689 484
11	0.675 735	0.709 110	0.708 781	0.687 382
12	0.674 354	0.685 205	0.685 163	0.681 737
13	0.808 772	0.784 659	0.794 617	0.822 072
14	0.718 324	0.721 138	0.720 891	0.835 760

对节点的脆弱性有不同程度的影响，这主要是因为并网节点不同，系统的网架结构发生变化，节点重要度发生了变化，而且网架结构的变化一定程度上也影响了节点的运行状态，导致节点的状态脆弱性也发生变化，进而导致节点综合脆弱度的改变。

5 结束语

本文考虑了电力系统脆弱性的两个方面：状态脆弱性与结构脆弱性，并将风电场并入电网，以一种断线故障作为扰动，通过 MATLAB 编程，分析了风电并网前后、风电并网点以及不同风速对电力系统节点脆弱度的影响。由分析结果可知，风电场并网后，需要保证系统中的无功充足，有必要对一些敏感节点进行无功补偿。由于篇幅有限，本文对风电场模型没有做深入的分析，风电机组和风电场的建模有待进一步细化，另外算例中扰动情景设置的还比较少，今后在这部分还需做更深入的研究，以更加合理地找出系统中的脆弱性节点，为系统规划及安全稳定运行提供可靠依据。

参 考 文 献

- [1] 张硕, 李庚银, 周明. 含风电场的发输电系统可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 8-14.
- [2] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓明, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.
- [3] Chai Chompoo-inwai, Lee WeiJen, Fuangfoo P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system [J]. IEEE

Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.

- [4] 陈宁, 朱凌志, 王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-107.
- [5] 马静, 王希, 王增平. 基于线路运行介数的过负荷脆弱性评估 [J]. 电网技术, 2012, 36(6): 47-50.
- [6] 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.
- [7] 丁剑, 白晓民, 赵伟, 等. 基于二维平面拟合的电网脆弱性分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 1-4.
- [8] 类延民, 李华强, 林茂君. 含风电场的电力系统节点电压脆弱性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 58-62.
- [9] Fouad A A, Zhou Qin, Vitttal V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [10] 李扬, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 10-14.
- [11] 刘群英, 刘俊勇, 刘启方, 等. 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.
- [12] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
- [13] 朱涛, 张水平, 郭戎潇, 等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1902-1905.
- [14] 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.
- [15] 廖明夫, Gasch R, Twle J. 风力发电技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- [16] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.

收稿日期: 2013-03-04

作者简介:

申永涛(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性, E-mail: syt19880927@163.com;

刘宗歧(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性。

(责任编辑: 杨秋霞)