

分布式电源接入对系统脆弱性影响分析

吕彩艳, 程若发, 杨宏超, 王雪薇

(南昌航空大学 信息工程学院, 南昌 330063)

摘要: 微电网脆弱性评估即是找出电网自身的薄弱环节, 以增强其安全稳定性, 但传统的脆弱性评估忽略了电网本身结构特性以及分布式电源的接入对微电网脆弱性的影响; 基于此, 对分布式电源 (Distributed Generation, DG) 加入系统前后节点的脆弱性进行了比较分析; 有针对性的提出加权的综合脆弱性指标, 其中结构脆弱性指标是基于节点度数和线路电抗值对节点重要度进行评估; 运行脆弱性指标包括各节点的电压质量和线路的有功功率平衡度; 对加入不同类型 DG 的 IEEE33 节点系统进行仿真计算, 得出不同类型 DG 以及不同并网点的系统脆弱度, 充分评估分布式电源加入对系统脆弱性的影响; 仿真算例验证了所提指标的有效性, 且不同类型分布式电源的接入能够有效降低系统脆弱性, 提高系统的安全性能。

关键词: 分布式电源; 结构脆弱性; 运行脆弱性; 综合脆弱性; 潮流计算

Impact of Distributed Generation on Power System Vulnerability

Lv Caiyan, Cheng Ruofa, Yang Hongchao, Wang Xuewei

(College of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Vulnerability assessment is a method that find out weak link of microgrid to enhance its security stability, which neglect influences of Structural characteristics of power grid and distributed generation connected. Based on this situation, the node vulnerability of system with and without the distributed generation (DG) is compared and analyzed. A weighted integrated vulnerability indicator is proposed to assess the vulnerability of microgrid. Structure vulnerability put forward a method to evaluate node importance based on node degree and line reactance. Run vulnerability indicator includes voltage quality of each node and the active power balance of line. The proposed method has been tested in IEEE 33 bus systems with different types of DG, The effect of power system with distributed generation on system vulnerability is evaluated by comparing the effects of different types of DG and different parallel points. At last, simulation results verify the validity of the proposed indicators, and different types of DG can effectively reduce system vulnerability and improves the system's security.

Keywords: distributed generation; structure vulnerability; run vulnerability; integrated vulnerability; power flow calculation

0 引言

分布式电源作为普通大电网的补充, 以其高效环保, 就地消纳电力的优点得到了迅速的发展。而脆弱性作为电力系统本身的固有属性, DG 的大规模接入势必影响系统节点的运行状态, 进而影响系统整体的脆弱性。因此研究分布式电源接入电网给系统带来的影响意义重大。

目前, 国内外相关学者对分布式电源已经有较多的研究成果^[1-2], 详细介绍了含 DG 的潮流计算方法以及对系统电压的影响; 对于电力系统的脆弱性也有一些研究成果^[3-10], 文献 [11] 从微电网的可靠性角度出发分析了系统的安全性能; 文献 [12] 分析风电接入对系统节点脆弱性的影响, 主要分析了风电场带来的影响; 文献 [13] 评估了含风电场的电力系统可靠性。

基于上述思想以及现有文献研究的不足, 本文综合考虑静态结构脆弱性和动态运行脆弱性, 构造加权的综合脆弱性函数。在微电网系统中加入 DG, 计算含 DG 的节点脆弱度, 通过不同的算例说明了脆弱性指标的合理性以及对对比分析了不同类型 DG 以及不同并网节点对系统脆弱性的影响, 从而更好地保证微电网系统的安全稳定性能。

1 含 DG 的微电网脆弱性评估模型

1.1 微网脆弱性指标要求

微电网的脆弱性可以理解为当系统中某一部分或元件受到干扰而崩溃, 进而导致系统中其他部分崩溃的行为。因此如何正确评估系统的脆弱性以及分析不同类型 DG 和不同并网节点对系统脆弱性的影响是关键问题。

目前微电网会大量引入 DG, 网络结构则变得更加复杂, 因此对微电网的结构脆弱性进行评估十分必要。另外, 微电网的运行状态与脆弱性有紧密联系, 因此本文建立基于网络结构和运行的综合脆弱性指标, 从而较好的评估系统的脆弱性。

分布式电源 (DG) 指的是直接分布在配电网或负荷附近的发电设施, DG 作为传统电网的补充, 随着其技术性能的不断改善, 在提高配电网供电质量的同时还减少了化石能源的损耗和污染。

收稿日期: 2017-12-17; **修回日期:** 2018-01-03。

基金项目: 国家基金项目(51567019, 51167013); 省教育厅项目(GJJ11165)。

作者简介: 吕彩艳(1992-), 女, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事微电网优化方向的研究。

程若发(1971-), 男, 安徽六安人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事微电网建模与仿真方向的研究。

1.2 分布式电源的节点类型

分布式电源主要有太阳能光伏发电、风力发电、燃料电池、微型燃气轮机等几种^[14-17]。DG 主要有以下 3 种接口方式: 1) 同步发电机接口; 2) 异步发电机接口; 3) 电力电子变换器接口。根据 DG 的种类以及其并网接口的不同, 可将其分成 4 种不同的节点类型: PQ 型节点、PV 型节点、PI 型节点以及 PQ (V) 型节点。

采用同步发电机功率因数控制的 DG 通常作为 PQ 型节点, 例如风力发电机组^[4], 另外采用恒功率因数控制的电力电子变换器接口型的 DG 也作为 PQ 型节点。

采用恒电压控制模式的风力发电机作为 PV 节点^[4], 通过电压控制逆变器接入电网的光伏发电作为 PV 节点, 微型燃气轮机和燃料电池也作为 PV 节点。

通过电流控制逆变器接入电网的光伏发电作为 PI 节点处理。

在潮流计算中, 采用异步发电机的风力发电作为 PQ (V) 节点处理^[4]。

1.3 含 DG 的脆弱性评估模型

不含 DG 的配电网在进行潮流计算时, 通常只有两种节点类型: 节点和 PQ 节点。节点是出口母线根节点, PQ 节点为其他负荷节点。DG 的加入使配电网增加了新的节点类型, 下面介绍各类节点型 DG 在潮流计算中的模型。

1.3.1 PQ 节点

PQ 节点型 DG 的特点是恒定的输出有功功率和无功率, 其潮流计算公式为:

$$\begin{cases} P_{DG} = -P_s \\ Q_{DG} = -Q_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_s 和 Q_s 分别表示 PQ 节点型 DG 的有功功率和无功率。

1.3.2 PV 节点

PV 节点型 DG 的特点是有功功率和额定电压是恒定的, 其潮流计算公式为:

$$\begin{cases} P_{DG} = -P_s \\ V_{DG} = -V_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_s 为 PV 节点型 DG 的有功输出; V_s 为 PV 节点型 DG 的端口额定电压。用前推回带法进行配电网潮流计算时要求负荷类型为 PQ 节点, 故需对 PV 节点进行处理使其转化为 PQ 节点。可以根据 PV 节点电压偏差对无功功率进行修正, 即:

$$Q^t = Q^{t-1} + \Delta Q = Q^{t-1} + f(\Delta V^{t-1}) \quad (3)$$

式中, $f(\Delta V^{t-1})$ 是根据 ΔV^{t-1} 求得的无功功率修正量, t 为当前迭代数。

1.3.3 PI 节点

PI 节点型 DG 的特点是有功功率和节点注入电流是恒定的, 其潮流计算公式为:

$$\begin{cases} P_{DG} = -P_s \\ I_{DG} = -I_s \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_s 和 I_s 分别为 PI 节点型 DG 的有功输出功率和节

点注入电流。

1.3.4 PQ (V) 节点

PQ (V) 节点型 DG 的特点是有功功率恒定不变, 迭代过程中的无功功率可由上次迭代的电压幅值算出, 潮流计算公式为:

$$\begin{cases} P_{DG} = -P_s \\ Q_{DG}^t = -f(V^{t-1}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, Q_{DG}^t 为第 t 次迭代的无功功率。

2 微电网的脆弱性评估

2.1 结构脆弱性评估指标

微电网作为一个复杂的电力系统, 其包括发电机等各负荷节点, 以及各输电线路, 而在此文中, 线路的权值则用电抗值来表示, 从而在系统模型中加入了电气元件参数, 使得网络运行更加贴近实际。目前对于复杂网络结构的特性研究大部分采用计算节点的重要度来描述网络结构, 例如节点收缩法等, 主要考虑了节点之间的最短路径, 节点介数以及线路介数等, 有些则单独的考虑节点或线路的差异性, 考虑节点的度数, 从而定义网络结构熵。虽然能够较好的分析网络的结构特性, 但是从节点或线路单一的考虑其差异性, 存在片面性。

因此本文结合节点和线路, 考虑其差异性, 并定义加权的网络结构熵概念, 构造结构脆弱性评估指标, 进而分析系统的结构脆弱性。

节点差异性体现在节点重要度之间的区别, 用节点度的分布情况来描述, 可得节点差异性如下:

$$D_i = (1 - P(k_i)) * N \quad (6)$$

其中: $P(k_i)$ 表示节点度数为 k_i 的概率, k_i 表示节点度, N 为节点数目。

因为节点度数为 k_i , 所以当选择一条线路时, 节点被选中连接的概率应为 k_i 倍, 综合思量节点与线路的关联性, 线路的权重则用节点领域内的电抗值 $\sum W_{ij}$ 来表示, 因此定义线路差异性为:

$$L_i = k_i * D_i * \sum W_{ij} \quad (7)$$

归纳上述节点和线路差异性, 确定中间量 B_i 如下:

$$B_i = (D_i + L_i) / 2 \quad (8)$$

因此节点重要度为:

$$I_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i} = \frac{(k_i * \sum W_{ij} + 1) * (1 - P(k_i))}{\sum_{i=1}^N (k_i * \sum W_{ij} + 1) * (1 - P(k_i))} \quad (9)$$

2.2 运行脆弱性评估指标

2.2.1 电压质量指标

运行状态脆弱性是从不同的运行角度对微电网的状态进行分析, 包括节点电压, 有功功率等, 目前对于运行脆弱性指标的建立还没有统一标准, 但是大部分都有考虑其节点电压质量。因为微电网的结构或者运行状态的改变都会引起节点电压的变化, 所以用节点电压的偏移量与节点允许的最大

电压偏移量的比值作为电压质量指标, 它的值越大, 表明该节点越不稳定, 脆弱性更高, 其公式如下所示:

$$VQ(i) = \frac{\sum_{i=1}^N |V_i - V_{cr}|}{\Delta V_{lim}} \quad (10)$$

式中, N 表示节点数目, V_i 表示节点运行电压, V_{cr} 表示参考额定电压, ΔV_{lim} 为节点的最大允许电压偏移量, VQ 为节点电压质量指标。

2.2.2 有功功率平衡度指标

微电网中的各节点负荷实际功率、线路的实际传输功率、电流大小和线路有功损耗等都与电网运行息息相关。而分布式电源 DG 接入网络, 可以有效降低线路远距离传输的有功功率, 减少线路有功损耗。同样, 线路的权值用电抗表示, 定义微电网的有功功率平衡度指标^[17]为:

$$OL(i) = \frac{L_T}{\sum \tau_i} = \frac{\sum_l W_l \times P_l}{\sum_l (W_l)} \quad (11)$$

式中, W_l 为线路电抗值, P_l 为线路传输的有功功率, OL_i 为有功功率平衡度指标。指标 OL_i 反应了微电网线路传输功率在距离上的均匀程度, OL_i 越大表明传输的远距离有功功率越多, 对电网有功功率的均匀分布越不利。另外, 该指标的权值为电网各个线路的电抗值, 能够较好的体现运行状态中有功功率的传输情况, 因此, OL_i 指标值越小, 即电网远距离传输功率越少, 有功功率在网络中的潮流则越均匀, 即脆弱性越低。

2.3 综合脆弱性评估指标

结合结构脆弱性指标和运行脆弱性指标建立加权综合脆弱性指标。对于各项指标运用层次分析法^[6]赋予不同的权重值, 得到综合脆弱性评估指标 ISV 如下所示:

$$ISV_i = \omega_1 * I(i) + \omega_2 * VQ(i) + \omega_3 * OL(i) \quad (12)$$

$$ISV = \sum_{i=1}^N ISV_i \quad (13)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 表示各项脆弱性指标的权重值, ISV_i 表示系统节点的脆弱度, ISV 为微电网系统的综合脆弱度。

2.4 评估仿真内容

根据上文 3.1 节和 3.2 节所述的结构脆弱性指标和运行脆弱性指标两个脆弱性指标可以求得网络系统的综合整体脆弱性情况, 另外, 根据 2.2 节所述的不同类型 DG 的评估模型可以仿真出系统在不同 DG 类型接入以及不同并网节点状态下的脆弱性指标值, 根据仿真得出的不同结果值可以对网络系统进行脆弱性的分析, 从而可以得出不同类型 DG 以及不同并网点对系统不同程度的影响, 以及判断网络在接入哪种 DG 以及并网在哪个节点时所受的脆弱性更低, 即更不容易崩溃, 更安全。在此结果之上, 可以通过合理的接入分布式电源从而更好地保证电力系统的安全稳定运行。

3 算例分析

本文通过 IEEE33 节点系统分析系统在不同 DG 以及不用并网节点下的系统脆弱性, 系统总负荷为 3 715.0 kW + j2300 kvar, 基准电压 12.66 kV, 有 5 个联络开关, 其网络拓扑图如图 1 所示, 具体网络参数参见文献 [7]。

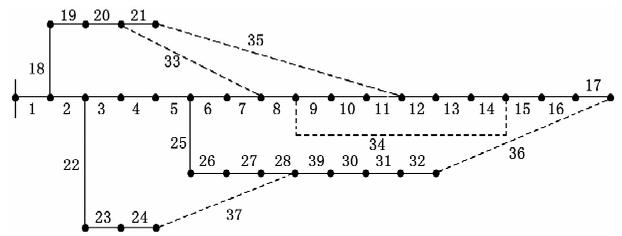


图 1 IEEE33 节点配电系统图

为更好地分析不同类型 DG 以及不同并网节点对系统脆弱性的影响, 通过 3 种方案进行比较分析, 如下:

方案一: 并入 4 个相同类型的 DG, 参数如表 1 所示;

方案二: 并入 4 个不同类型的 DG, 参数如表 2 所示;

方案三: 节点类型同方案二, 并入节点号不同;

表 1 方案一 DG 并网参数

DG 编号	并入节点号	节点类型	有功功率/kW	功率因数
DG1	3	PQ	50	0.8
DG2	6	PQ	100	0.9
DG3	24	PQ	200	0.9
DG4	29	PQ	100	1.0

方案一中并入的 4 个 DG 都为 PQ 节点类型, 通过该方案与原始网络进行结果对比, 可以得出接入 PQ 节点对系统脆弱性带来的影响, 为了更好地测试不同节点类型对系统脆弱性的不同程度的影响, 在方案二中加入 4 种不同种类的节点型 DG, 如表 2 所示。

表 2 方案二 DG 并网参数

DG 编号	并入节点号	节点类型	参数
DG1	4	PQ	$P=100$ kW $\cos\varphi=0.9$
DG2	7	PI	$P=200$ kW $I_s=50$ A
DG3	25	PV	$P=200$ kW $V_s=0.98$ pu $Q_{max}=300$ kW $Q_{min}=0$ kW
DG4	30	PQ(V)	$P=200$ kW

方案二中 DG4 为异步风电发电机, 额定电压为 0.69 kV, 定子电抗 0.00453 Ω , 转子电抗 0.149152 Ω , 定子电抗与转子电抗之和 0.199904 Ω , 转子电阻 0.00486 Ω , 励磁电抗 2.205952 Ω , 单组电容器的额定容量 40 kvar, 初始功率因数 0.9。

方案三中 4 个 DG 种类以及参数均与方案二相同, 把 DG1 的并网节点从 4 号改到 16 号, 其他 3 个 DG 的节点位置保持不变。通过对比分析方案二和方案三可以得出不同的并网节点对系统产生的不同程度的影响。

根据公式 (6) ~ (11), 仿真计算出原始网络以及各种方案的节点结构和运行脆弱性, 并根据公式 (12) ~ (13) 得出综合脆弱度如表 3 所示。

表 3 DG 加入前后节点综合脆弱度

序号	节点号	原始网络	方案一	方案二	方案三
1	3	0.0743	0.0664	0.0588	0.0565
2	4	0.0549	0.0494	0.0405	0.0369
3	6	0.1469	0.1342	0.1129	0.0970
4	7	0.1043	0.0976	0.0743	0.0583
5	13	0.1321	0.1252	0.1094	0.0697
6	16	0.1216	0.1147	0.0988	0.0596
7	17	0.1303	0.1234	0.1074	0.0752
8	24	0.0659	0.0538	0.0484	0.0517
9	25	0.0652	0.0591	0.0445	0.0485
10	29	0.1256	0.1137	0.0974	0.0909
11	30	0.1149	0.1059	0.0897	0.0831

由表 3 和图 2 结果可知，相对于原始网络，加入 4 个 DG 之后的节点综合脆弱度均有所降低；对比方案一和二，当 4 个 DG 为不同类型的节点时，其综合脆弱度比相同节点类型时的脆弱度更低，比如节点 7，从 0.0976 降到了 0.0743，降低了 23.87%，节点 30，从 0.1059 降到了 0.0897，降低了 15.30%；对比方案二和三可知，当并网节点号从 4 号改到 16 号之后，各节点的综合脆弱度均有所降低，如节点 17，从 0.1074 降到了 0.0752，降低了 29.98%，且节点 16 号的脆弱度从 0.0988 降到了 0.0596，降低了 39.68%，降低幅度较大，说明在节点 16 号并入 DG 能够更好地降低系统的综合脆弱度，提高系统的稳定安全性能。为更好地分析系统整体脆弱性的变化，系统综合脆弱性列表如图 2 所示。

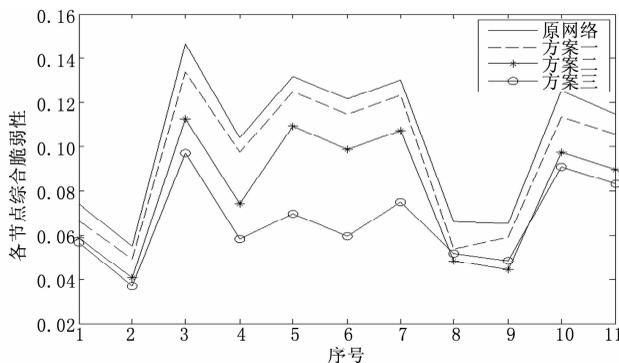


图 2 DG 加入前后节点综合脆弱度

表 4 各方案系统综合脆弱度

方案	原始网络	方案一	方案二	方案三
综合 ISV	2.9241	2.7058	2.3164	1.9079

由表 4 和图 3 结果可知，各个方案的系统脆弱性均有所降低，加入 4 个 DG 之后的系统综合脆弱度从 2.9241 降到了 2.7058，降低了 7.47%，方案二从 2.9241 降到了 2.3164，降低了 20.78%，方案三降低了 34.75%，说明 DG 的加入能够很好的降低系统的脆弱性，提高系统的安全性能，且当加入不同类型 DG 之后的系统综合脆弱度更低，系

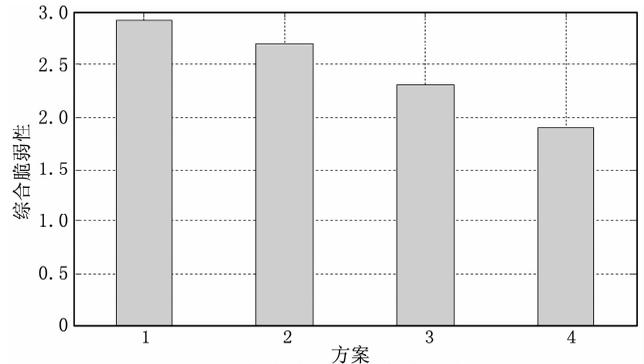


图 3 各方案系统综合脆弱度

统更安全，另外当并网节点发生改变后，系统的综合脆弱度也相应变化，且并网节点从 4 改到 16 号之后，系统的脆弱性更加低，说明不同的并网节点对系统脆弱度有不同的影响，且当合理并网的时候能够有效降低系统脆弱度，提高系统安全稳定性能。

表 5 为原始网络以及方案三的十个节点的脆弱度排序结果，由表中结果可知，节点 13、17、29、16、30 排序变化明显，表明 DG 的接入会改变节点脆弱度的排序，对系统节点脆弱度有不同程度的影响，是因为分布式电源的接入改变了系统运行状态，进而改变系统的综合脆弱性，另外如节点 6、7、3 等的排序没有变化，说明脆弱性还受电网自身结构的影响。

表 5 加入 DG 之后节点脆弱度排序结果

方案	节点脆弱度排序(从高到低)										
原网络	6	13	17	29	16	30	7	3	24	25	4
方案三	6	29	30	17	13	16	7	3	24	25	4

4 总结

本文结合系统的节点重要度，线路电抗值，节点度数以及电压质量，有功功率平衡度等运行状态参数，确定微电网的结构脆弱性指标和运行脆弱性指标，进而构造加权的综合脆弱性指标，通过各算例的仿真结果表明，分布式电源的接入能够有效的降低系统的脆弱度，进而提高系统的安全性能，且不同类型 DG 以及不同并网点对系统节点脆弱度的影响各不相同，节点脆弱度的排序也发生了变化，是因为分布式电源的加入改变了系统的运行状态，进而改变了系统的综合脆弱度。因此在实际应用中，应合理适当地加入分布式电源以降低系统脆弱度，减少发现奔溃的可能，以提高系统安全稳定性能。

另外，可深入研究加入 DG 容量和位置对系统脆弱性的影响，以便更好地找出系统的脆弱节点，为电网的安全稳定运行提供可靠的理论依据。

参考文献:

[1] 张立梅, 唐 巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 123-130.