

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.010

# 含分布式发电的有源配电网电压稳态指标计算研究\*

蒋斌<sup>1</sup> 吴健<sup>1</sup> 冯亮<sup>1</sup> 吴奎华<sup>1</sup> 梁荣<sup>1</sup> 杨波<sup>1</sup> 李雪<sup>2</sup> 陈豪杰<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院 济南 250021; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院  
上海市电站自动化技术重点实验室 上海 200072)

**摘要:**针对分布式电源接入配电网带来的电压静态稳定性问题,主要研究含分布式发电的有源配电网电压稳定性。首先提出了根据潮流解来计算整个配电网的电压稳定性指标方法以反映系统各节点的电压稳定性,然后考虑分布式发电作为一个负的负荷直接注入,分别建立了不同类型分布式电源在配电网潮流计算的模型。最后,以分布式电源中典型风电为例,对IEEE-33节点有源配电网进行仿真,分析了不同风机出力、风机接入及有功出力波动对有源配电网系统电压稳定的影响,仿真实验表明分布式电源的接入可以有效提高系统的电压稳定性。

**关键词:** 分布式电源;配电网;电压静态稳定指标;风电;潮流计算

中图分类号: TM74;TN711.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4054

## Research on static voltage stability calculation indicator of active distribution network with distributed generation

Jiang Bin<sup>1</sup> Wu Jian<sup>1</sup> Feng Liang<sup>1</sup> Wu Kuihua<sup>1</sup> Liang Rong<sup>1</sup> Yang Bo<sup>1</sup> Li Xue<sup>2</sup> Chen Haojie<sup>2</sup>

(1. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250021, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronics Engineering  
and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of steady state voltage stability caused by distributed generation access to distribution network, the voltage stability of active distribution network including distribution network is mainly investigated in the paper. To reflect system voltage stability of each node, a voltage stability index method is firstly proposed according to the results of power flow calculation for the whole distribution network. Considering distributed generation as a negative load direct injection, different models of distributed generation in power flow calculation are then established. Finally, taking the typical wind power of distributed generation for example, active distribution network of IEEE-33 node is simulated, and different fan efforts, fan access and active output fluctuation influence on the voltage stability of active distribution network system are analyzed in detail. The simulation results show that the distributed network with distributed generation can effectively improve the voltage stability.

**Keywords:** distribution generation; distribution network; steady state voltage stability index; wind power; power flow calculation

## 1 引言

分布式发电(distributed generation, DG)由于具有对环境污染小、灵活性好、效率高等优点<sup>[1-2]</sup>,目前已逐渐被

大量地接入到配电网。然而,分布式发电的接入不但使配电网的结构和运行方式发生改变<sup>[3]</sup>,而且分布式发电如风电场接入配电网,风能的随机性和间歇性将会引起配电网潮流大小及方向的频繁变化、电压过高、潮流反向等问题,从而严重影响电能质量<sup>[4]</sup>,严重威胁电力系统安

全稳定运行<sup>[5]</sup>。

随着大量 DG 的接入,传统配电网从单电源辐射状结构转变为多电源结构,且潮流流向从松弛节点往外辐射转变为随 DG 发电的波动而改变,甚至出现潮流反向等问题<sup>[6-7]</sup>。针对大量 DG 接入有源配电网,如何定量分析其对有源配电网的影响,以便更好地主动防御分布式发电接入的波动性引起的配电网安全事故。

目前,国内外学者考虑分布式发电接入配电网,研究其对电力系统稳定性带来的影响,并取得一些初步研究成果。如文献[8]针对分布式电源接入配网产生的稳定性问题,基于潮流解分析了风电的接入位置、接入容量及故障对配网电压稳定性的影响。文献[9]基于配电网静态电压稳定性指标,研究不同接口类型的 DG 并网,对配电网电压稳定的影响,但是该指标在系统重负荷情况下,由于线性度恶化,从而无法准确判断电压稳定性。文献[10]考虑典型并网光伏电源结构,从光伏渗透率、系统动态负荷水平、线路长度及是否装设无功补偿装置等角度,研究了并网光伏电源对典型配电网暂态电压稳定的影响。文献[11]考虑 DG 类型、接入位置、容量和功率因素,研究其对配电网电压稳定的影响。以上研究主要聚焦 DG 对配电网的影响,然而较少考虑 DG 的随机变化对微电网的安全稳定运行影响。

针对 DG 的类型、接入容量、发电的随机性等影响配电网的潮流流向以及配电网的稳定性问题,本文以风电接入配电网为例,考虑不同风电有功出力、风电配套无功补偿设备容量限制以及风机接入位置等因素,深入分析和研究其对配电网的电压静态安全稳定影响,并以 IEEE-33 节点配电网系统为例进行仿真分析,仿真分析和验证了分布式电源对配电网静态电压稳定的影响。

## 2 电压静态稳定指标

静态电压稳定原理是:基于潮流方程是否有解或解的存在性来进行分析,通常潮流方程可行的临界解被认为是电压稳定的极限点。电压稳定性指标是以潮流解存在的极端条件来判断的,其能够反映运行状态离崩溃状态还有多远,系统最容易发生电压崩溃的区域以及节点。

Jasmon 等人<sup>[12-13]</sup>研究表明可根据潮流解来计算整个配电网的电压稳定性指标 (voltage stability index, VSI)<sup>[14-15]</sup>。以两节点配电网系统为例,其结构如图 1 所示。在图 1 中, $I_{ij}$  为节点  $i$  流向节点  $j$  的电流,  $V_i$ 、 $V_j$  分别表示节点  $i$ 、 $j$  的电压,  $R_{ij} + jX_{ij}$  表示支路  $ij$  上的阻抗值,  $P_i + jQ_i$ 、 $P_j + jQ_j$  分别表示节点  $i$ 、 $j$  的负荷。

由图 1 可知,计算  $I_{ij}$  和  $S_j$  如下:

$$I_{ij} = (V_i - V_j) / (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (1)$$

$$S_j = P_j + jQ_j = V_j I_{ij}^* \quad (2)$$

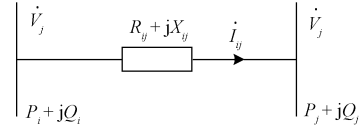


图 1 两节点配电网系统

Fig. 1 Two-node distribution network system

式中:“\*”表示共轭。

由式(1)和(2)变换可得:

$$I_{ij} = (P_j - jQ_j) / (V_j^*) = (V_i - V_j) / (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (3)$$

进一步变换式(3)有:

$$(P_j - jQ_j)(R_{ij} + jX_{ij}) = V_j^*(V_i - V_j) \quad (4)$$

为了进一步化简,记  $V_i = V_{Ri} + jV_{Li}$ ,  $V_j = V_{Rj} + jV_{Lj}$ , 则:

$$\begin{aligned} & P_j R_{ij} + Q_j X_{ij} + j(X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j) = \\ & (V_{Rj} - jV_{Lj})(V_{Ri} + jV_{Li}) - (V_{Rj} - jV_{Lj})(V_{Rj} + jV_{Lj}) \end{aligned} \quad (5)$$

对式(5)化简,则:

$$\begin{aligned} & V_{Rj}^2 + V_{Lj}^2 = [(V_{Ri} V_{Rj} + V_{Li} V_{Lj}) - (R_{ij} P_j + X_{ij} Q_j)] + \\ & j[(V_{Li} V_{Rj} - V_{Ri} V_{Lj}) - (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)] \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)中发现其等式左侧为一个实数,故其等式右边的虚部应为 0,即:

$$V_{Li} V_{Rj} - V_{Ri} V_{Lj} = X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j \quad (7)$$

从式(7),可得:

$$V_{Rj} = (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j + V_{Ri} V_{Lj}) / V_{Li} \quad (8)$$

$$V_{Lj} = (V_{Li} V_{Rj} - X_{ij} P_j + R_{ij} Q_j) / V_{Ri} \quad (9)$$

将式(8)和(9)分别代入式(6),则:

$$\begin{aligned} & V_{Lj}^2 (V_{Ri}^2 + V_{Li}^2) + V_{Lj} [2V_{Ri} (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j) - V_{Li}^3 - \\ & V_{Li} V_{Ri}^2] + (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)^2 - V_{Ri} V_{Li} (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j) + \\ & V_{Li}^2 (R_{ij} P_j + X_{ij} Q_j) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & V_{Rj}^2 (V_{Ri}^2 + V_{Li}^2) - V_{Rj} [2V_{Li} (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j) + V_{Ri}^3 + \\ & V_{Li} V_{Ri}^2] + (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)^2 + V_{Ri} V_{Li} (X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j) + \\ & V_{Ri}^2 (R_{ij} P_j + X_{ij} Q_j) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)和(11)是未知数  $V_{Lj}$  和  $V_{Rj}$  的一元二次方程,若有实数解,则下式必须成立:

$$4[(X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)^2 + V_i^2 (R_{ij} P_j + X_{ij} Q_j)] \leq V_i^4 \quad (12)$$

图 1 中的  $V_i$ 、 $V_j$ 、 $P_i + jQ_i$  和  $P_j + jQ_j$  通过潮流计算可得,在此基础上电压静态稳定指标可通过式(13)计算,即:

$$L_{ij} = 4[(X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)^2 + V_i^2 (R_{ij} P_j + X_{ij} Q_j)] / V_i^4 \quad (13)$$

为了保持系统电压稳定,  $L_{ij} \leq 1$ 。

注 1.  $L_{ij}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的这一支路的电压稳定指标,  $L_{ij}$  越小表明系统的稳定性也就越好;  $L_{ij}$  越大则系统

的电压稳定性就越差;若  $L_{ij}$  接近 1, 则系统的电压将会崩溃。

根据式(13), 整个配电网系统的静态电压稳定指标取全部支路中的最大电压稳定指标, 即:

$$L = \max(L_{12}, L_{23}, \dots, L_{33}) \quad (14)$$

注 2. 式(14)中  $L$  是所有支路中脆弱点, 当系统电压崩溃时, 一定是从脆弱点开始, 故可根据  $L$  的值与 1 之间的差值来判断配电网系统的电压稳定程度。

### 3 DGs 建模

以上主要分析了配电网系统的静态电压稳定指标, 在含 DG 的有源配电网潮流计算中为了简化处理, 把 DGs 当作一个负的负荷直接注入, 然而 DGs 有着不同的类型, 以下简要介绍 DGs 的建模。

#### 3.1 节点电抗矩阵的推导

假设有  $n$  个 PV 型 DGs, 则节点电抗矩阵  $X$  为一个  $n \times n$  的对称方阵, 其中对角元素  $x_{ii}$  表示第  $i$  个 PV 恒定型 DGs 的自电抗, 其值为该节点到等效电压源节点的支路电抗之和, 非对角元素  $x_{ij}$  表示两个 PV 节点的互电抗, 其值为两个 PV 节点到等效电压源节点之间的共同支路之和<sup>[16]</sup>。以两节点 DG 接入为例, 如图 2 所示。

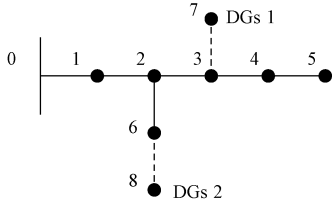


图 2 节点分布

Fig. 2 The distribution map of nodes

在图 2 中, 首先按照先负荷节点, 后 DGs 编号的原则进行编号, 其中 DGs 假设通过零阻抗的虚拟支路接入如图 2 中虚线部分, 故电抗为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{11} = X_1 + X_2 + X_3 + X_7 \\ x_{22} = X_1 + X_2 + X_6 + X_8 \\ x_{12} = x_{21} = X_1 + X_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $x_{11}$ 、 $x_{22}$  表示自电抗,  $x_{12}$ 、 $x_{21}$  表示互电抗,  $X_i$  表示支路  $i$  的电抗值, 虚拟支路上面电抗值为 0。

#### 3.2 无功初值赋予

仍以图 2 为例, 该 6 节点系统中, 在节点 3 和 6 处并入两台 P、V 恒定型 DGs, 即节点 7 和 8, 并通过虚拟支路连接, 故可得:

$$\begin{cases} Q'_7 = (Q_1 + Q_2)/2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \\ Q'_8 = (Q_1 + Q_2)/2 + Q_6 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $Q'_7$  和  $Q'_8$  为理想条件下, 不考虑无功注入上下限的初值;  $Q_i$  表示第  $i$  个负荷点的无功功率。

#### 3.3 不同类型的 DG

DG 一般分为 PQ 恒定型和 PV 恒定型<sup>[17]</sup>。

1) PQ 恒定型 DGs:

$$\begin{cases} P_i = -P_s \\ Q_i = -Q_s \end{cases} \quad (19)$$

2) PV 恒定型 DGs:

$$\begin{cases} P_i = -P_s \\ U_i = U_s \end{cases} \quad (20)$$

对 PV 恒定型 DGs, 其无功需满足:

$$Q^{k+1} = \begin{cases} -(Q^k - \Delta Q), & Q_{\min} \leq Q^k - \Delta Q \leq Q_{\max} \\ -Q_{\max}, & Q^k - \Delta Q \geq Q_{\max} \\ -Q_{\min}, & Q^k - \Delta Q \leq Q_{\min} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $Q^{k+1}$  表示第  $k+1$  次迭代无功计算值,  $Q^k$  表示第  $k$  次迭代无功注入量,  $\Delta Q$  表示无功修正量,  $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$  分别表示无功注入的上下限。

接下来, 着重对 PV 恒定型 DGs 中的无功修正量  $\Delta Q$  进行推导。若 DG 注入电网的电流方向为正方向, 则有节点注入电流增量矢量  $\Delta I$  和节点电压增量矢量  $\Delta U$  的关系需满足<sup>[18]</sup>:

$$Z \Delta I = \Delta U \quad (22)$$

式中:  $Z$  代表 PV 恒定型 DGs 的节点阻抗矩阵, 式(22)两边同乘以电压的幅值, 则:

$$U Z \Delta I = U \Delta U \quad (23)$$

由于首端线路电压幅值和相角保持不变, 而配电网系统中各 DG 的电压幅值及相角差很小, 可以近似认为其值等于基准电压, 故:

$$\Delta \bar{S}^* = \bar{U}^* \Delta I U \approx U \Delta I \quad (24)$$

式中:  $\Delta \bar{S}$  为复功率。

由式(22)~(24)可得:

$$Z \Delta \bar{S}^* = U \Delta \bar{U} \quad (25)$$

将  $Z = R + jX$ ,  $\Delta \bar{S}^* = \Delta P - j\Delta Q$ ,  $\Delta \bar{U} = \Delta U + j\Delta \delta$  代入式(25), 其实部为:

$$R \Delta P + X \Delta Q = U \Delta U \quad (26)$$

因为 P、V 恒定型 DGs 发出的有功恒定不变, 即  $\Delta P = 0$ , 故式(26)化简为:

$$X \Delta Q = U \Delta U \quad (27)$$

式(27)两边同乘以  $X^{-1}$ , 则:

$$\Delta Q = X^{-1} U \Delta U \quad (28)$$

因此, 由式(20)和(28)可得 PV 恒定型 DGs 的节点注入模型:

$$\begin{cases} P_i = -P_s \\ Q_i^{k+1} = -(Q_s - X^{-1}U_s\Delta U^k) \end{cases} \quad (29)$$

式中： $\Delta U^k$  为第  $k$  次迭代的 PV 节点计算电压的实部与给定电压的差值，其值为正需要减少无功补偿，反之则相反处理。

### 3.4 算法流程

以上电压稳定性指标算法的详细流程如下：

- 1) 根据 DG 的节点类型，设置各个 DG 节点的无功初值；
- 2) 接着进行 DG 节点的有功无功注入，然后进行潮流计算，在计算迭代中，根据 DG 节点无功限制以及无功修正量  $\Delta Q$ ，不断修正无功注入量直至潮流计算达到收敛要求；
- 3) 根据潮流计算结果，分析 DG 位置、注入无功容量限制以及 DG 发电的波动性对配电网系统电压的影响；
- 4) 根据潮流计算结果进行各个方案下的电压稳定指标计算，分析 DG 发电的波动性导致有功注入功率变化（考虑无功补偿设备正常运行，不会超出限制）以及对系统电压稳定的影响。

## 4 算例分析

本文以 IEEE-33 节点的配电网为例<sup>[19]</sup>，如图 3 所示，容量为  $3715 + j2300 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ，基准容量为  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，基准电压为  $12.66 \text{ kV}$ ，松弛节点的电压为  $1 \text{ p.u.}$ 。在图 3 中，节点 15、25 和 31 分别通过零阻抗的虚拟支路接入  $100 \text{ kW} \times 2$ 、 $100 \text{ kW}$  和  $100 \text{ kW} \times 2$  的风机，其额定功率为  $100 \text{ kW}$ 、切入风速  $3 \text{ m/s}$ 、额定风速  $12 \text{ m/s}$ 、切出风速  $30 \text{ m/s}$ 。

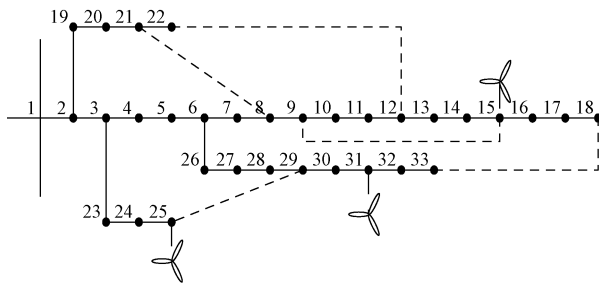


图 3 33 节点配网系统

Fig. 3 33-node distribution network system

注 3. 图 3 中虚线表示联络线，该 33 节点配电网系统正常运行时联络线上的开关处于开路状态，系统呈现辐射状开环运行。

### 4.1 风机出力对系统电压的影响

为了分析风机出力对配电网系统电压的影响，考虑风机有功出力的 3 种情况：1) 额定有功出力；2) 有功出力在平均风速下；3) 有功不接入。其中配套的无功补偿设

备独立工作，深入开展配电网电压稳定性研究。

风机有功出力为额定功率时的节点电压如图 4 所示，风机出力为平均风速下的节点电压如图 5 所示，风机有功不接入的节点电压如图 6 所示。表 1 为各个风机点有功无功的出力。

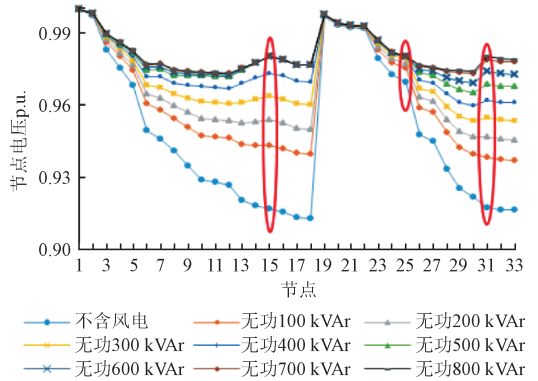


图 4 风机有功出力为额定功率时的节点电压  
Fig. 4 The node voltage with rated active power wind turbine (WT)

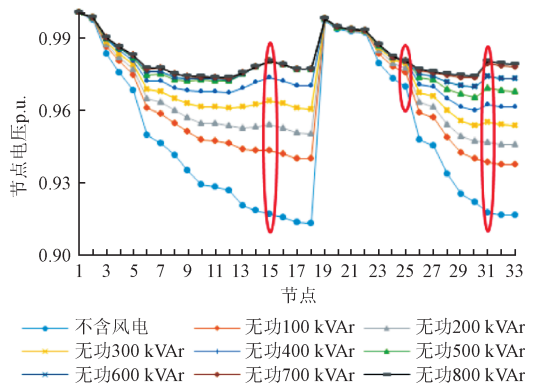


图 5 风机出力为平均风速下的节点电压  
Fig. 5 The node voltage under the WT output at average wind speed

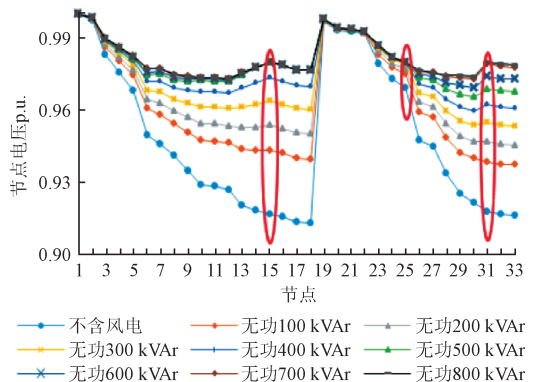


图 6 风机有功不接入的节点电压  
Fig. 6 The node voltage with the WT active power not plugged in

表1 各个风机点有功无功的出力

Table 1 The output of each wind turbine plugged node

风机有功 (额定功率)			风机有功 (平均风速)			风机有功 (不接入)		
节点	有功	无功	节点	有功	无功	节点	有功	无功
34	100	205	34	32	342	34	0	408
35	200	1 442	35	64	1667	35	0	1 777
36	200	843	36	64	1057	36	0	1 163

从图4、5和表1可以看出:1)风机的接入会使节点电压升高,同时电压随着无功补偿设备容量限制的提高而升高;2)风机有功不接入,只有无功补偿设备工作,同样也会使节点电压升高,但是风机有功功率注入量的增加,可以减少对无功补偿的需求;3)节点电压的高低与注入无功功率更相关,为了维持要求的电压水平,随着DG发电的波动,对无功补偿设备切入的无功功率亦不同。从理论上分析也可以发现:在潮流计算中,接有风机的节点注入如表1所示的有功功率和无功功率,等效处理后,该节点P、Q值减少,线路损耗 $\Delta S$ 会减少,进一步使得前一节点的等效负荷减少,依次前推,使得第一段线路的总等效功率减少,从而使得电压在回代计算中 $\Delta V(i)$ 的值和 $\delta V(i)$ 的值减少,节点电压会增大。因此,从上面的仿真结果与理论分析可知,仿真结果与理论完全相符。

从图4~6可以发现共同特征为节点19、20、21和22的电压基本不变,不随风机注入电网的有功功率和无功功率变化而产生变化。由前推回代潮流计算方法可知,在节点2的电压变化不大时,与节点2相连的支路19~22,该支路不包含DG且这一不节点电压也变化不大,仿真结果与理论实际符合。

#### 4.2 风机有功出力波动对系统电压稳定性的影响

以上分析风机出力对配电网系统有抬升节点电压的作用,为了进一步研究风机接入及其有功出力的波动对系统电压稳定的影响,本文利用电压稳定指标开展进一步研究。

图7所示为原始33节点配电网各个节点VSI指标的柱形图。结合图7和表2可以得出,无DG接入时,节点6的VSI是最大的,是系统的脆弱点,随着负荷的增

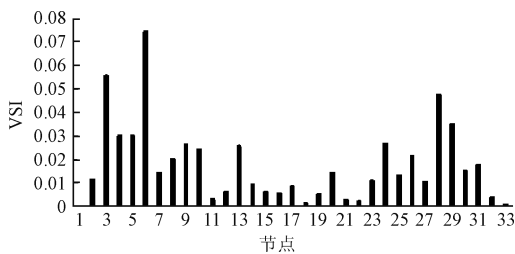


图7 原始33节点配电网VSI指标

Fig.7 VSI index of the original 33-node distribution network

大,该节点会首先产生电压崩溃,但是当风机接入系统后,节点3变成脆弱点且整体VSI的值下降,整个系统的静态电压稳定性得到提高,而且不同的风机工作状态亦会使最大VSI不同。从理论上可知,节点的功率和电压的变化都会使节点的VSI发生变化,潮流计算中注入功率减少,节点电压增大,使得 $L_{ij}$ 值减少,静态电压稳定性得以提高,仿真结果与理论一致。

表2 33节点配网最大VSI指标

Table 2 The maximum VSI index of 33-node distribution network

原始		风机有功 (额定功率)		风机有功 (平均风速)		风机有功 (不接入)	
节点	VSI	节点	VSI	节点	VSI	节点	VSI
6	0.0746	3	0.0330	3	0.0346	3	0.0354

## 5 结论

本文主要研究了含分布式发电的有源配电网电压稳定性。首先提出了根据潮流解来计算整个配电网的电压稳定性指标方法以反映系统各节点的电压稳定性,然后考虑分布式发电作为一个负的负荷直接注入,分别建立了不同类型分布式电源在配电网潮流计算的模型。最后,以分布式电源中典型风电为例,对IEEE-33节点有源配电网进行仿真,实验结果表明风机接入配电网,风力发电机的自身功率、风速会对配电网的静态电压稳定性产生不同程度的影响,风机向电网注入功率会使得节点电压升高,可有效提高配电网静态电压稳定性,这DG接入配电网节点及选址和运行策略规划提供理论基础和技术支撑。进一步,当加入光伏等其他分布式发电单元接入配电网系统,开展含更多类型分布式发电的配电网系统研究是一个非常值得研究的方向。

## 参考文献

[1] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75,88.  
LIANG Y W, HU ZH J, CHEN Y P. A survey of distributed generation and its application in power system [J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75,88.

[2] 吴顺风,江明,杨晨悦,等. 分布式电源并网后的自适应负载反孤岛方法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(1):52-57.  
WU SH F, JIANG M, YANG CH Y, et al. Adaptive load anti-islanding method of grid-connected distributed power system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 52-57.

- [ 3 ] 冬雷,廖晓钟,刘广忱,等. 分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2005,26(S2):750-753.  
DONG L, LIAO X ZH, LIU G CH, et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complementary generation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(S2):750-753.
- [ 4 ] 崔嘉,杨俊友,李连富,等. 含分布式风电场的配电网电压波动分析与抑制[J]. 电网技术, 2015,39(12):3414-3420.  
CUI J, YANG J Y, LI L F, et al. Voltage fluctuation analysis and mitigation of distribution network containing distributed wind farm [J]. Power System Technology, 2015,39(12):3414-3420.
- [ 5 ] 李斌,刘天琪,李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009,33(3):84-87.  
LI B, LIU T Q, LI X Y. Impact of distributed generation on power system voltage stability [J]. Power System Technology, 2009,33(3):84-87.
- [ 6 ] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010,34(10):140-146.  
XU X Y, HUANG Y H, LIU CH, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010,34(10):140-146.
- [ 7 ] 陶维青,杨刚,丁明,等. 改进模因算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(2):265-273.  
TAO W Q, YANG G, DING M, et al. Application of improved memetic algorithm for fault location in distribution network with DG [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(2):265-273.
- [ 8 ] 李东坡,殷鸿雁,张明理. 风电接入对配电网电压稳定的影响研究[J]. 东北电力技术, 2013,34(1):29-32.  
LI D P, YIN H Y, ZHANG M L. The influences of wind power integration on the voltage stability of distribution network[J]. Northeast Electric Power Technology, 2013,34(1):29-32.
- [ 9 ] 陈海焱,段献忠,陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006,30(19):27-30.  
CHEN H Y, DUAN X ZH, CHEN J F. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology, 2006,30(19):27-30.
- [ 10 ] 葛晓慧,赵波. 光伏电源接入对配电网电压稳定的影响研究[J]. 浙江电力, 2011,30(10):6-13.  
GE X H, ZHAO B. Research on influence of photovoltaic source integration on distribution network voltage stability[J]. Zhejiang Electric Power, 2011,30(10):6-13.
- [ 11 ] 苏文辉,林章岁,李喜兰,等. 分布式电源对配电网静态电压稳定的影响研究[J]. 电测与仪表, 2014,51(14):41-46.  
SU W H, LIN Z S, LI X L, et al. Research on impact of distributed generation on static voltage stability of distribution networks [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014,51(14):41-46.
- [ 12 ] JASMON G B, LEE L H C C. Stability of load flow techniques for distribution system voltage stability analysis [J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1991,138(6):479-484.
- [ 13 ] JASMON G B, LEE L H C C. New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion [J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1993,140(2):87-90.
- [ 14 ] 武晓蒙,刘健,毕鹏翔,等. 配电网电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2006,30(24):31-35.  
WU X M, LIU J, BI X P, et al. Research on voltage stability of distribution networks [J]. Power System Technology, 2006,30(24):31-35.
- [ 15 ] 张谦,廖清芬,唐飞,等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015(15):42-48.  
ZHANG Q, LIAO Q F, TANG F, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(15):42-48.
- [ 16 ] 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.  
ZHANG L M, TANG W. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(8):123-130.
- [ 17 ] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006,30(1):35-40.  
CHEN H Y, CHEN J F, DUAN X ZH. Study on power flow calculation of distribution system with DGs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):35-40.
- [ 18 ] 闫丽梅,谢一冰,徐建军,等. 改进的前推回代法在含分布式电源配电网计算中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2013,47(6):117-123.  
YANG L M, XIE Y B, XU J J, et al. Improved forward and backward substitution in calculation of power distribution

network with distributed generation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47 (6): 117-123.

- [19] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1402-1407.

## 作者简介



**蒋斌**, 1963年出生, 硕士, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院高级工程师, 研究方向为电网规划与生产管理。

**Jiang Bin** was born in 1963, M. Sc. Now is a senior engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes electric power network planning and production management.



**吴健**, 1973年出生, 1994年获得山东大学硕士学位, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院高级工程师, 研究方向为电网规划与设计。

**Wu Jian** was born in 1973, got M. Sc. from Shandong University in 1994. Now is a senior engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes electric power network planning and designing technology.



**冯亮**, 1984年出生, 2013年获得天津大学博士学位, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院高级工程师, 研究方向为智能配电网规划及电动汽车充电设施规划。

**Feng Liang** was born in 1984, got Ph. D. from Tianjin University in 2013. Now is a senior engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes smart distribution network planning and electric vehicle charging infrastructure planning.



**吴奎华**, 1983年出生, 2008年获得浙江大学硕士学位, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院高级工程师, 研究方向为配电网规划及规划信息化。

**Wu Kuihua** was born in 1984, got M. Sc. from Zhejiang University in 2008.

Now is a senior engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes distribution network planning and planning informationization.



**梁荣**, 1987年出生, 2011年获得哈尔滨工业大学硕士学位, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院工程师, 研究方向为电网规划设计技术。

**Liang Rong** was born in 1987, got M. Sc. from Harbin Institute of Technology in 2011. Now is an engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes electric power network planning and designing technology.



**杨波**, 1985年出生, 2011年获得山东大学硕士学位, 现为国网山东省电力公司经济技术研究院工程师, 研究方向为电网规划设计技术。

**Yang Bo** was born in 1985, got M. Sc. from Shandong University in 2011. Now is an engineer at the Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company. His main research interest includes electric power network planning and designing technology.



**李雪**, 1979年出生, 博士, 现为上海大学副教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与运行。

E-mail: lixue@i.shu.edu.cn

**Li Xue** was born 1979, Ph. D., associate professor and master supervisor in Shanghai University. Her main research interest includes power system analysis and operation.



**陈豪杰** (通讯作者), 1991年出生, 现为上海大学在读硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与运行。

E-mail: chenhaojiewarren@hotmail.com

**Chen Haojie** (Corresponding author) was born in 1991, now is a postgraduate at Shanghai University. His main research interest includes power system analysis and operation.