

分布式电源接入对配电网电压的影响研究

分布式电源（DG）接入配电网，改变了配电网结构和潮流分布，影响了配电网电压。基于链式配电网，分析了不含DG时配电网的电压损失和单独考虑DG时配电网的电压损失。基于电压叠加定理，将两部分电压损失相加，得出辐射电网下DG接入对配电网电压损失的影响表达式。此外建立单点接入下DG准入容量的数学模型。采用IEEE 69节点配电网标准算例，分析DG接入位置和容量对配电网电压的影响，以及接入位置对DG准入容量的影响。

王安梅/许昌学院电气信息工程学院



王安梅/讲师

随着能源危机以及环境污染问题的加重，风电、光伏发电以及其他采用清洁能源的分布式电源（DG）受到越来越多的关注。DG大规模的应用，使配电由传统的单电源辐射网络变成多电源的新型网络，这将会改变潮流分布以及潮流方向。传统的配电网中潮流总是由系统电源沿着馈线流向末端负荷，并且随着变电站电气距离的增加而减小。DG的接入，使单向潮流变为双向潮流分布，增加了潮流分布的不确定性，从而影响了配电网电压。DG对配电网电压的影响有积极作用，对配电网的馈线电压起到支撑作用，同时不合理的DG配置可能导致配电网中的某些节点出现过电压或者严重的电压波动。

本文针对放射状链式配电网，分别分析不含DG时配电网的电压损失和单独考虑DG时配电网的电压损失。基于电压叠加定理，将两部分电压损失相加，得出DG接入对配电网电压损失的影响表达式。

关键词/Keywords

分布式电源 ·
配电网 ·
电压分布 ·
接入容量 ·
准入容量 ·

式。并从接入容量和接入位置两个方面分析DG对配电网电压分布的影响，同时求出DG的准入容量，防止出现较大的电压偏离，为合理布置DG提供依据。

含DG的配电网电压分布模型

分别分析不含DG时配电网的电压损失与只考虑DG时配电网的电压损失，通过电压叠加的方法，将两部分组合，具体分析DG接入对配电网电压的损失情况。

1. 不含DG时配电网的电压分布模型

采用辐射状的理想配电网，如图1所示。此时不接入DG，配电网馈线总长度为 m 。沿着馈线均匀分布着相同的负荷节点，总负荷值为 $P_L + jQ_L$ ，在距离电源 n 处设置馈线节点 n 。

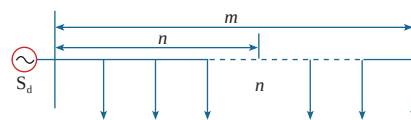


图1 不含DG的理想配电网

无穷大电源到 n 节点处的系统负荷为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{n}{m} P_L \\ Q_1 = \frac{n}{m} Q_L \end{cases} \quad (1)$$

n 节点到馈线末端的系统负荷为

$$\begin{cases} P_2 = (1 - \frac{n}{m}) P_L \\ Q_2 = (1 - \frac{n}{m}) Q_L \end{cases} \quad (2)$$

则 n 点处的电压损耗为

$$\Delta U_n = \Delta U_{n1} + \Delta U_{n2} \quad (3)$$

河南省教育厅科学技术研究重点项目（14A140020），

许昌市基础与前沿技术研究计划项目（1404007）。

式中, ΔU_{n1} 为无穷大电源到 n 节点处的系统负荷引起的电压损耗, 这一部分负荷用集中等效负荷代替; ΔU_{n2} 为 n 节点到馈线末端的集中等效负荷引起的电压损耗。各自表达式为

$$\Delta U_{n1} = n \left(\frac{rP_1 + xQ_1}{U_N} \right) = \frac{n^2}{m} \left(\frac{rP_L + xQ_L}{U_N} \right) \quad (4)$$

$$\Delta U_{n2} = (m-n) \left(\frac{rP_2 + xQ_{n2}}{U_N} \right) = \frac{(m-n)^2}{n} \left(\frac{rP_L + xQ_L}{U_N} \right) \quad (5)$$

式中, r 、 x 分别为均匀配电网中相邻两个负荷节点之间的电阻值和电抗值; U_N 为线路额定电压值。

由式 (3) ~ 式 (5) 可知 n 点处的电压损耗为

$$\Delta U_n = \Delta U_{n1} + \Delta U_{n2} = \frac{2n^2 + 2mn + m^2}{n} \left(\frac{rP_L + xQ_L}{U_N} \right) \quad (6)$$

2. 只考虑DG时配电网的电压分布模型

DG单独作用时的电压损耗如图2所示。即在图1中配电线路上距离母线 g 的任一节点处接入DG, 发电功率为 $P_G + jQ_G$ 。只考虑DG的影响力, 则将系统电源侧短路。与负荷相比较, 配电网中线路阻抗引起的电压损耗很小, 可以不考虑线路的数值。因此在DG到电源侧母线这一段, 即 g 点之前的线路对馈线电压有损耗作用, 此处DG对线路的电压损耗为负值。

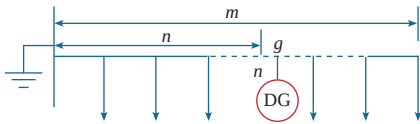


图2 DG单独作用时电压损耗

在节点1 ~ 节点 g 之间的任一点 n 的电压损耗为

$$\begin{cases} \Delta U_G = -n \frac{rP_G + xQ_G}{U_N} \\ 1 \leq n \leq g \end{cases} \quad (7)$$

对于 g 点之后的配电网线路, DG 对其没有直接影响, 但是对 g 点电压的提高, 间接影响了其后各点电压, 负荷节点 g 后电压损耗为

$$\begin{cases} \Delta U_G = -g \frac{rP_{DG} + xQ_{DG}}{U_N} \\ g \leq n \leq m \end{cases} \quad (8)$$

利用叠加定理, 得到含DG的配电线路的电压损耗为

$$\Delta U = \Delta U_n + \Delta U_G \quad (9)$$

$$\Delta U = \begin{cases} \frac{2n^2 + 2mn + m^2}{n} \left(\frac{rP_L + xQ_L}{U_N} \right) - n \frac{rP_G + xQ_G}{U_N} & 1 \leq n \leq g \\ \frac{2n^2 + 2mn + m^2}{n} \left(\frac{rP_L + xQ_L}{U_N} \right) - g \frac{rP_{DG} + xQ_{DG}}{U_N} & g \leq n \leq m \end{cases} \quad (10)$$

准入容量计算模型

DG的准入容量是指在保证电网安全稳定的前提下, DG可接入的最大容量。DG接入改变了系统的潮流分布情况, 从而影响了节点电压。原有的电网结构可能无法保证系统安全运行, 而重新规划建设电网需要大量投资和时间, 无法满足DG的快速发展。所以在不改变电网结构的前提下, 研究配电网可消纳的DG最大容量。

假设DG的接入位置为 m , 输入功率为 P_G^m 、 Q_G^m 。分布式电源准入容量的目标函数为

$$f = \max(P_G^m) \quad (11)$$

(1) 潮流约束

$$\begin{aligned} P_G^i - P_L^i &= \sum_{j \in N} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_G^i - Q_L^i &= \sum_{j \in N} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ Q_G &= \tan \varphi P_G \end{aligned} \quad (12)$$

式中, P_L^i 、 Q_L^i 为节点 i 处的负荷需求; N 为节点集合; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为节点导纳矩阵元素; $U_i U_j$ 为线路两端电压; θ 为电压相角; φ 为DG的功率因数角。

(2) 线路容量约束

$$|S_{ij}| \leq \bar{S}_{ij} \quad (13)$$

式中, S_{ij} 为线路视在功率。

(3) 节点电压约束

$$\underline{U}_i \leq U_i \leq \bar{U}_i \quad (14)$$

式中, $\bar{U}_i$ 和 $\underline{U}_i$ 分别为节点电压的上下限值。

根据DG容量对配电网电压的影响可知, 容量越大, 节点电压增量越大, 则出现电压越限的可能性越大。逐次增加容量, 计算电网潮流, 然后校验节点电压和线路潮流约束。如果满足条件, 则进一步叠加容量, 直到求出满足约束的最大容

量, 这样求解迭代次数较多, 所以采用二分法进行简化, 具体的求解流程如下:

1) 设置容量的上下极限 $\bar{P}$ 和 $\underline{P}$, 其中 $\underline{P}(0)=0$, 为DG接入馈线末端时节点电压和线路潮流越限的容量, 迭代次数 $i=0$ 。

$$2) P(i) = \frac{1}{2}[\underline{P}(i) + \bar{P}(i)]。$$

3) 求解潮流方程, 并判断是否满足节点电压和线路潮流约束。如果满足, 则 $\underline{P}(i+1)=P(i)$, $\bar{P}(i+1)=\bar{P}(i)$; 否则 $\underline{P}(i+1)=\underline{P}(i)$, $\bar{P}(i+1)=P(i)$ 。

4) 校验 $\left| \frac{P(i+1)-P(i)}{P(0)-\bar{P}(0)} \right| \leq \varepsilon$ 是否成立, 如果判断不成立, 则 $i=i+1$, 继续重复步骤2)~步骤3); 如果成立, 则 $P(i)$ 为所求的准入容量。

算例分析

IEEE 69节点的配电网为辐射状结构, 如图3所示。选择节点N3~N27所在的分支作为主馈线接入DG, 并分析DG的接入点和容量对配电网的影响。

1. 接入点

在不改变其他运行条件, 只改变DG接入位置

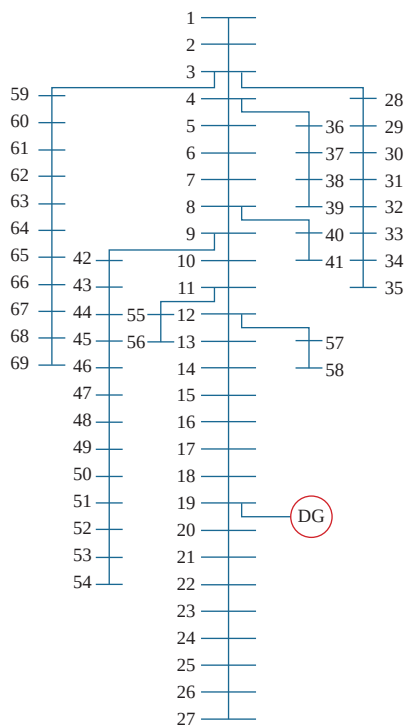


图3 IEEE 69节点的辐射状配电网

时, 观测DG接入对配电网馈线电压带来的影响。依次在节点N3、N9、N15、N21和N27接入容量 $P=200$ kW的逆变型DG, 观察各节点电压变化情况。

DG接入点改变时馈线电压分布和馈线电压增量分别如图4和图5所示。图4和图5表明: 在馈线上接入DG时, 配电网馈线上各节点电压均有提高, 且馈线末端节点N27的电压提高量大于同一馈线上的其他任何节点。节点N3~N27上, 随着接入位置越靠近馈线末端, 馈线节点电压的提高幅度越大, 因此可得到以下结论:

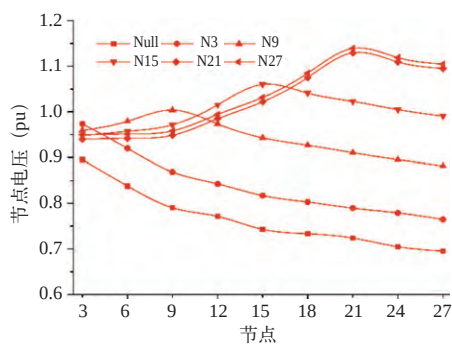


图4 DG接入点改变时馈线电压分布

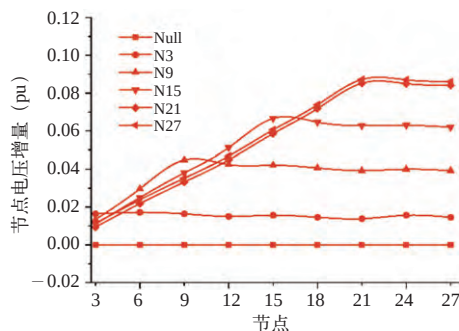


图5 DG接入点改变时馈线电压增量

1) 配电网中任何一点接入DG, 都有助于减少馈线上的电压损失, 对馈线电压有支撑作用, 馈线上所有的节点电压都会有所提高, 且越靠近末端的节点, 提高量越大; 在不改变其他运行条件时, DG接入位置越靠近末端, 对馈线电压的支撑作用越强。

2) 此外还可以观察到DG接入点处的电压增量最大, 在负荷均匀分布的配电网馈线上, DG接入点的电压增量与接入点到系统电源的距离成正比相关。接入点越靠近系统电源, 则接入点的电压易提高到电压的最大值处; 接入点越靠近馈线末

端,接入点的电压增量幅度越小,但是此时DG对配电网整体节点电压提高的效果越均匀。

3) 节点电压变化率曲线位于并网点以前时,斜率较大,变化率上升较快,且在并网点附近接近于最大值,之后曲线逐渐趋于水平,节点电压变化率与并网点近似相等。这说明DG的接入,只对并网点以前各节点的电压变化影响较大,并网点后各节点的电压只是被动地跟随并网点电压的变化而变化。

2. 接入容量

在不改变其他运行条件,只改变DG接入容量时,观测DG接入对配电网馈线电压带来的影响。依次在节点N15接入容量100 kW、150 kW、200 kW、250 kW和300 kW的逆变型DG,观察各节点电压变化情况。

DG容量改变时馈线电压增量如图6所示。由图6可知,接入配电网同一节点的DG容量越大,配电网各节点电压增量越大,而且对DG并网节点所在馈线段各节点电压影响越大,整个配电系统的电压水平不断提高,对电压支撑作用不断增强。

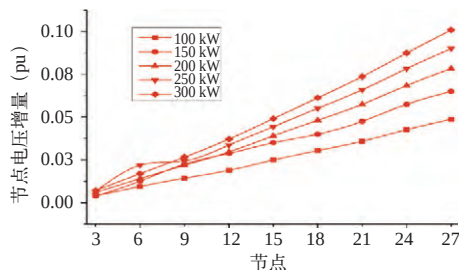


图6 DG容量改变时馈线电压增量

接入小容量的DG时,DG优先满足附近节点的负荷需求,此时系统电源侧到DG接入点的潮流减小,电压差也有所减小,DG将提高接入点的节点电压,其所在分支处节点的下游馈线节点电压也会有所升高。但是DG接入容量过大时,DG发出功率大于其下端支路的总负荷需求,导致接入点附近的节点出现电压越限,并且剩余的功率会流向上游节点,出现逆向潮流,导致馈线末端节点电压高于首端节点电压。

3. 单电源接入容量

在不改变其他运行条件,只改变DG接入位置

时,采用本文提出的计算模型和分析方法求出DG的准入容量。设置DG的接入位置为节点N3、N9、N15、N21和N27,计算配电网可接受的最大DG容量,结果曲线如图7所示。

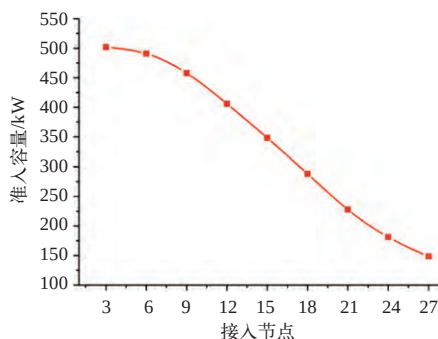


图7 不同接入点时的分布式电源准入容量

由图7可知,在节点电压和线路容量满足约束条件前提下,对于不同接入点的DG,配电网可接受的最大容量有显著差别。接入位置越靠近馈线末端,则准入容量越小,结果再次验证了前文分析的结论。当并网位置逐渐远离系统母线时,DG对系统电压的提高作用越显著。

结束语

本文分析了DG接入对链式配电网稳态电压分布的影响,并计算单电源接入时的准入容量。得出如下结论:

1) 配电网中任何一点接入DG,都有助于减少馈线上的电压损失,越靠近末端的节点,提高量越大;在不改变其他运行条件时,DG接入位置越靠近末端,对馈线电压的支撑作用越强。

2) 节点电压限值了DG的最大接入容量,接入位置越靠近馈线末端,准入容量越小。选择馈线末端作为接入点,可计算DG接入容量的最保守结果。在不改变电网结构的前提下,可以保证电网安全稳定运行。

3) 本文仅考虑了电网的节点电压约束,未分析电网的网损和电气设备运行约束。此外不同特性的DG会对电网的暂态稳定产生不同的影响,但本文未考虑动态特性。所以按照本文模型得到的准入容量结果可能偏于乐观。

(收稿日期:2015-02-10) EA