

分布式电源并网后配电网的节点电压变化分析

分布式电源(DG)的大规模应用,提升了配电网的供电可靠性,也改变了配电网中馈线电压的分布。建立节点的电压增量模型,分析DG功率因数对配电网电压的影响规律。根据电压敏感度分析节点电压对DG准入容量的约束,提出求解DG准入容量的模型。采用IEEE 69节点配电网标准算例,验证DG在不同功率因数和电源类型下配电网电压的分布规律,分析功率因数对DG可接入容量的影响。

杨捷 马临超/河南机电高等专科学校

郭晓静 高丽萍/国网洛阳供电公司经济技术研究所

分布式电源(DG)的大规模应用,提高了新能源的利用效率,同时缓解了能源危机。在初期应用中,风电以及光伏发电采用小容量、分散式的方式接入配电网,对配电网中的馈线电压起到了很好的支撑作用,减少了节点的电压损失。随着DG渗透率的提高和接入点的增多,不合理的电源接入容易造成部分节点电压越限,危害电网安全和设备安全。很多文献已经对DG的选址定容进行了相关研究,提出DG接入靠近馈线末端时,对馈线的电压支撑作用最大,并且处于馈线末端的节点更容易受到DG的影响^[1]。小容量的DG对馈线电压带来积极作用,不适当的大容量电源则会带来逆向潮流,使靠近母线端的节点电压高于末端节点电压,出现电压越限的情况^[2]。这些研究结论都对DG的安全接入提供了参考依据,但是关于DG功率因数对配电网电压影响的研究较少。为了保证电网

的安全稳定运行,各节点电压则必须在合理的范围内,这对DG的接入容量有一定限制。以上研究仅分析了DG接入对配电网电压的影响,忽略了对可接入容量的研究,无法对DG的实际接入提供参考依据。

基于辐射状配电网,本文分析馈线上节点电压的增量模型,并提出DG功率因数和配电网电压的影响规律。通过分析电压敏感度公式,提炼电压指标和接入容量的数值关系式,研究配电网对DG的消纳能力。最后采用IEEE 69节点配电网标准算例,验证DG在不同功率因数和接入类型下配电网电压的分布规律,以及分析功率因数对DG可接入容量的影响。

含DG的配电网电压分布模型

DG接入配电网,向配电网注入有功功率,这将会对配电网各个节点的电压分布产生影响,同时可能导致某些节点出现电压越限。一条馈线有 $n+1$ 个节点,每个节点均接有负荷和DG,如图1所示。图中, N_0 节点为配电网母线; S_d 为无穷大电源; (R_0, X_0) 为电源内阻抗; (R_i, X_i) 为第 i 段线路的等效阻抗; $(P_{Li} + jQ_{Li})$ 为第 i 个节点负荷功率; P_{Gi} 为第 i 个节点上DG的输出功率。

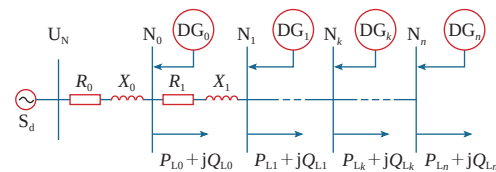


图1 含DG的配电网模型

2013年度河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2013GGJS-201)。



杨捷/副教授

关键词/Keywords

分布式电源 ·
配电网 ·
功率因数 ·
电压敏感度 ·
准入容量 ·

馈线上任意节点 n 的电压可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_n \% = \frac{\sum_{j=0}^n [R_j(P_L - P_G) + X_j(Q_L - Q_G)]}{U_N^2} \times 100\% \\ P_L = \sum_{i=j}^n P_{L_i} \\ P_G = \sum_{i=j}^n P_{G_i} \\ Q_L = \sum_{i=j}^n Q_{L_i} \\ Q_G = \sum_{i=j}^n Q_{G_i} \end{array} \right. \quad (1)$$

为了便于分析DG的影响,将式(1)中有关DG的部分提取出来,即

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_n \% = \Delta U_L + \Delta U_G \\ \Delta U_L = \frac{\sum_{j=0}^n (R_j P_L + X_j Q_L)}{U_N^2} \times 100 \\ \Delta U_G = \frac{\sum_{j=0}^n (R_j P_G + X_j Q_G)}{U_N^2} \times 100 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, ΔU_L 为由负荷引起的电压损失; ΔU_G 为DG对配电网电压的影响。

通过式(2)可以得出DG的有功和无功都对电压损失有影响。

将DG的有功和无功表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} P_G = S_G \cos \theta \\ Q_G = S_G \sin \theta \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, S_G 为DG的视在功率; $\cos \theta$ 为功率因数。

结合式(2)和式(3)可得

$$\Delta U_G = \frac{\sum_{j=0}^n (R_j \cos \theta + X_j \sin \theta) S}{U_N^2} \times 100 \quad (4)$$

1. 功率因数

DG可以运用功率因数超前或者滞后的方式,即从系统吸收无功功率,或者向系统发出无功功率。通常在分析计算中,忽略DG的无功功率,以下两种情况则不可忽略其对配电网电压的影响:

①当DG功率因数较小时,DG发出或者吸收的无功

功率较大;②在配电网中负荷较小并且采用大截面、远距离的馈线时,馈线电抗较大。

当DG采用功率因数超前的方式运行时, $\sin \theta < 0$,根据式(4)可知,虽然电压减少,但是作用有限;当DG采用功率因数滞后的方式运行时,DG发出无功功率, $\sin \theta > 0$,将有助于补偿馈线的电压损失,提升馈线电压。因此DG功率因数滞后运行比功率因数超前运行对馈线电压的提升作用更明显。

2. 节点类型

根据DG的运行特性以及并网控制方式,可分为PQ节点、PI节点、PV节点和PQ(V)节点四种节点类型。柴油机通过同步发电机并入电网,采用功率因数控制,提供恒定的功率输出,当运行在额定工况附近时,可看作PQ节点^[3]。PQ节点稳定地输出无功功率,有利于减少电压损失,对配电网电压起到很好的支撑作用。

燃料电池的输出为直流,通过功率调节单元并网,并通过改变调制度和换流器超前角实现对输出交流电压和功率的调整。燃料电池主要通过控制超前角实现电压幅值的稳定输出,以及控制电池内部氢氧的反应速度实现有功的稳定输出,因此可视为PV节点^[4]。PV节点通过调整无功实现并网处的电压稳定,将对节点周围的电压起到提升作用,其主要作用为稳定电压,比PQ节点的DG可以提供更多的支撑作用。

光伏电池和蓄电池通过电流控制逆变器接入电网,实现电流的稳定输出。同时可全部输出有功或者损失部分有功功率,对配电网进行无功补偿,可实现有功的稳定输出,因此可视为PI节点^[5]。PI节点输出恒定的有功功率,同样可以补偿节点电压损失,但是效果没有PQ节点好。

双馈感应机的发电机定子直接馈入电网,转子通过部分功率变频器馈入电网,在输出有功功率的同时,还要从系统吸收一定的无功功率,可视为PQ(V)节点^[6]。PQ(V)节点由于吸收无功,所以容易增大电压损失,减少对电压的作用。

接入容量研究

在配电网的任意节点接入DG,都会引起节点

电压变化。接入DG可以理解为节点注入功率发生变化,节点电压与DG有功和无功的变化关系可以表示为^[7]

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, ΔP 、 ΔQ 分别为DG的有功和无功增量; ΔV 和 $\Delta\delta$ 分别为节点电压和相角的增量; J 为雅可比矩阵中的元素。

为了表征节点电压和DG有功的关系式,令 $\Delta Q=0$,则

$$\Delta P = (J_{PV} - J_{P\delta} J_{Q\delta}^{-1} J_{QV}) \Delta V_P = M_{PV} \Delta V_P \quad (6)$$

$$\Delta V_P = M_{PV}^{-1} \Delta P \quad (7)$$

采用类似的方法,假设 $\Delta P=0$,则可以推导出节点电压和DG无功的关系式,即

$$\Delta Q = (J_{QV} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PV}) \Delta V_Q = M_{QV} \Delta V_Q \quad (8)$$

$$\Delta V_Q = M_{QV}^{-1} \Delta Q \quad (9)$$

式中, M_{PV} 和 M_{QV} 为降阶的雅可比矩阵,表示节点电压变化量和DG注入功率的数值关系。

除了平衡节点,配电网中的其他节点可视为PQ节点。DG通常不主动参与系统电压调整,所以可以视为PQ节点。这时系统中的DG接入点都是PQ节点,且 M_{PV} 和 M_{QV} 是 N 阶方阵,则 M_{PV} 和 M_{QV} 可逆。

根据式(6)可以计算DG注入不同有功功率时节点电压的变化量,而式(9)可以计算不同功率因数的DG对节点电压的影响。在节点 i 接入功率为 P_i 和 Q_i 的DG,则配电网中任意节点 j 的电压变化量可表示为

$$\Delta V_j = \Delta V_P + \Delta V_Q \quad (10)$$

用功率因数角和有功来表示无功,即

$$\Delta Q_i = \Delta P_i \tan \varphi_i \quad (11)$$

联立式(6)~式(11),则电压偏移量可以表示为

$$\Delta V_j = M \Delta P_i \quad (12)$$

式中, $M = M_{PV}^{-1} \Delta P_i + M_{QV}^{-1} \Delta P_i \tan \varphi_i$ 。

DG运行在不同功率因数时,都会对节点电压有提升作用,节点电压的最大偏移量为

$$\overline{\Delta V_j} = \overline{V_j} - V_0 \quad (13)$$

式中, $\overline{V_j}$ 为节点电压的上限; V_0 为不加入DG时,节点的初始电压; $\overline{\Delta V_j}$ 为节点电压的最大偏移量。

要确保节点 j 电压不越限,则配置在节点 i 处DG可注入到配电网的最大有功功率为

$$P_i^m = \frac{\overline{\Delta V_j}}{M} \quad (14)$$

式(14)中的有功功率仅可以保证节点 j 电压不越限,无法保证其他节点的电压运行情况。对于所有网络节点,节点 i 处DG的准入功率为系统所有节点可接入功率的最小值,即

$$P_i = \min_{i \in n} P_i^m \quad (15)$$

式中, P_i 为DG在节点 i 处的最大可接入有功; n 为配电网中的节点集合。

仿真算例

IEEE 69节点的配电网算例为辐射状结构^[8],选择N3~N27节点所在的分支作为主馈线。

1. 配电网电压

在不改变其他运行条件时,将总容量400 kV·A,功率因数依次为 $\cos \varphi = 0.9$ 、 0.8 (滞后), $\cos \varphi = 1$ 和 $\cos \varphi = 0.9$ 、 0.85 (超前)的DG接入到馈线N3~N27节点。观测DG运行方式对配电网馈线电压分布的影响,仿真结果如图2所示。

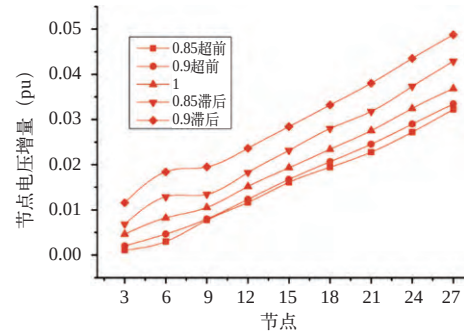


图2 DG功率因数改变时馈线各节点电压增量

图2表明:当 $\cos \varphi = 0.9$ (滞后)时,馈线电压提升比 $\cos \varphi = 1$ 时明显;当 $\cos \varphi = 0.9$ (超前)时,馈线电压提升量比 $\cos \varphi = 1$ 时小。故验证了理论分析所得结论:在不改变其他运行条件时,DG功率因数滞后运行方式比功率因数超前运行方式对馈线电压的提升作用更明显。

对接入配电网中相同位置、相同容量的DG而

言,随着接入DG功率因数的减小,其注入主动配电网的无功功率绝对值逐渐增加,有功功率值逐渐减小。当变流器以同一功率因数并网时,它在输出无功功率与吸收无功功率下的状况对接入点处电压的影响是不同的。有功功率对接入点的电压有提升的作用;而无功功率对接入点电压的影响情况有容性无功和感性无功之分。容性无功对接入点的电压有提升的作用;而感性无功对接入点的电压起到降低的作用。故当有功功率和无功功率同时作用时,具体对接入点电压的影响是提升还是降低,要取决于DG输出有功、无功所占比例对主动配电网接入点的电压影响程度。

DG以 $\cos \varphi = 0.9$ 接入,与以 $\cos \varphi = 1$ 接入时的电压情况相比,当DG输出的是容性无功功率时,接入点的电压被提升;当DG吸收的是感性无功功率时,接入点电压被降低。故相同容量的DG以不同的功率因数接入配电网时,以 $\cos \varphi = 1$ 输出为基准,超前的功率因数输出使节点电压发生降落,滞后的功率因数输出对接入点电压及配电网整体电压分布情况的影响则取决于所接入DG的功率与线路阻抗大小的关系。证实了理论分析得到的结论,同时间接地说明了可以采用改变DG接入时功率因数的措施来达到降低主动配电网节点电压的目的,从而有效地解决接入点电压越限的问题。

在不改变运行条件下,将总容量为400 kV·A和功率因数依次为 $\cos \varphi = 0.9$ (滞后)的PQ型、PV型、PI型和PQ(V)型的DG分别接入N27,观测DG接入对配电网电压分布的影响,仿真结果如图3所示。

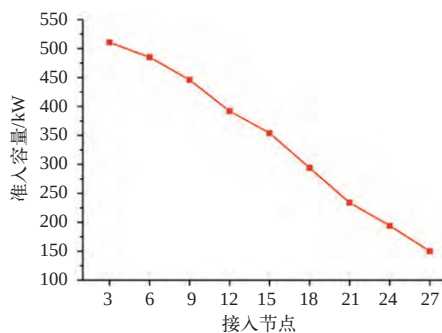


图3 DG节点类型改变时馈线各节点电压增量

任意类型的DG接入,都不同程度地提高了整个配电系统的电压水平,且DG接入位置与根节点

距离越远,对配电网电压水平的支撑作用越大,越靠近馈线末端的节点,电压增量越多。PQ型DG输出无功,可以提高节点电压水平;PV型DG输出无功功率的大小与节点电压有关,具有一定的电压调节能力,如果电压设置不合理或者节点电压变动太大,很容易使PV型DG发出无功功率越限;PI型DG的接入对配电网也起到了电压支撑的作用,提高了配电网电压的稳定性,原因是PI型DG在输出有功功率的同时,也提供了无功功率的支持;尽管PQ(V)型DG要从电网吸收无功功率,但同时也输出了有功功率,综合效果还是对配电网起到了电压支撑的作用,提高了配电网电压稳定性。可以观察到在四种节点类型中,PV的电压支撑作用最强,而PQ(V)最弱。

2. DG可接入容量

本文考虑节点电压的合理范围为0.95~1.05 (pu)。采用 $\cos \varphi = 0.9$ (滞后)的DG,分别接入馈线的N3~N27节点,观察在不同接入点时,DG可接入容量的变化趋势,结果如图4所示。

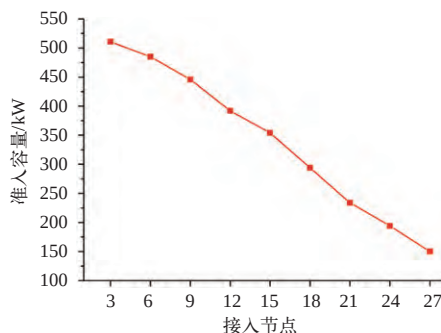


图4 不同接入点下DG的准入容量

图4结果表明:DG的接入点越靠近馈线末端,可接入容量越小。这是因为注入相同的有功功率,在馈线末端可以对配电网节点产生较大的影响,即具有较大的电压灵敏度,因此馈线末端的可接入容量小于馈线首端。

选择在N15接入DG,功率因数依次为 $\cos \varphi = 0.9$ 、0.8(滞后), $\cos \varphi = 1$ 和 $\cos \varphi = 0.9$ 、0.85(超前)。观测DG功率因数对配电网接纳能力的影响,分析结果如图5所示。

图5的曲线表明:当功率因数超前时,DG的可接入容量大于单位功率因数,并且随着功率因数

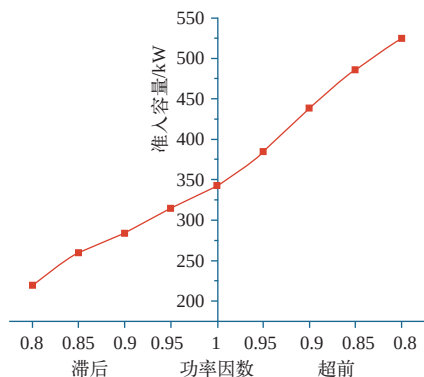


图5 不同功率因数下DG的准入容量

的增大而增大；当功率因数滞后时，DG的可接入容量小于单位功率因数，并且随着功率因数增大而减小。这是因为在超前功率因数下，DG吸收无功，抵消有功对节点电压的部分增加效果，在可接受的电压范围内能够接入更多的容量。

结束语

1) DG运行在功率因数滞后方式时, 向电网提供无功功率, 将有助于补偿馈线的电压损失, 提升馈线电压。DG功率因数滞后运行比功率因数超前运行对馈线电压的提升作用更明显。

2) 不同节点类型的DG对配电网电压的支撑作用不同, PV 节点最强, $PQ(V)$ 节点最弱, 需要合理设置 PV 节点的输出电压, 避免出现电压越限。

3) 本文使用电压灵敏度来计算分布式发电的最大接入容量。功率因数滞后的DG具有较低的准入功率,此外DG的接入点越靠近馈线末端,可接入容量越小。

参考文献

- [1] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (16): 56-60.
- [2] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配电网静态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30 (19): 27-30.
- [3] 杨雄, 卫志农, 孙国强, 等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (3): 99-107.
- [4] 李新, 彭怡, 赵晶晶, 等. 分布式电源并网的潮流计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2009 (17): 78-81.
- [5] 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.
- [6] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (13): 35-40.
- [7] 段献忠, 袁骏, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述 [J]. 电网技术, 1997, 21 (9): 7-10.
- [8] Xavier J S, Das D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (4): 2473-2480.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告