

分布式电源并网对配电网电压的影响研究

分布式电源(DG)接入配电网可以降低输电损耗,提高配电网供电可靠性,改善线路整体电压水平,是集中式电源的有效补充。但随着分布式电源容量的不断增大,也会带来配电网电压越限等问题,需要对其进行合理规划。基于馈线电压降落原理,从DG接入位置、接入容量、接入方式和运行方式四个方面分析了分布式电压并网对配电网电压分布的影响机理,包含电压越限及节点电压均衡问题。采用电力系统仿真软件DIgSILENT/Power Factory建立33节点系统模型,验证DG在四种并网方式下的配电网电压分布规律,并给出相应的改善措施。

谭瑾¹ 刘国峰¹ 郝丽丽² 马洲俊^{1,3} 徐同庆¹ 李乃双² / 1. 国网江苏省电力公司南京供电公司 2. 南京工业大学电气工程与控制科学学院 3. 河海大学能源与电气学院

0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)因其发电成本低、建设投资周期短、占地面积小、运行技术简单和控制灵活等优点,被广泛采用和推广^[1-3]。在目前的能源环境下,随着越来越多的光伏、风电等清洁能源以DG形式接入配电网,配电网内部的功率分配和馈线潮流发生了较大的变化,也给配电网带来诸如电压波动与闪变、电压越限和各节点电压分布不均衡等问题,危害电网及用户设备安全,增大线路损耗,因此需要对DG进行合理规划和控制^[4-6]。

分布式电源并网后,并网点电压随分布式电源输出功率的波动而变化,对整个配电系统的电压及电压分布将产生

极大影响,大大降低了配电系统的供电可靠性^[7]。研究表明,分布式电源并网后将提高配电网电压^[8],引起电压波动与闪变^[9]或电压暂降,其影响程度随DG的接入位置和接入容量等因素改变。文献[10]建立标准算例模型,分别从分布式电源位置、容量及运行方式三个方面研究分析了分布式电源并网对配电网电压分布的影响。文献[11]将不同分布式电源按照发电特性进行区别,通过理论分析,研究单DG和多DG并网时对配电网节点电压分布的影响;反推可知,为了使系统节点电压满足质量要求,势必要对系统内所接DG的位置、容量和运行方式有所约束。文献[12]采用遗传算法,以经济效益和运行成本比为目标优化分布式电源的接入位置和接入容量。文献[13]在DG的接入位置和接入容量未知的前提下,在规划扩展输电网过程中采用连续消除法对DG接入位置和接入容量进行优化计算。文献[14]分别对单个DG接入单分支线路和多个DG接入单分支电路两种情况应用电压稳定性判定指标分析DG接入如何影响电压分布和电压稳定性。研究大多基于智能算法优化DG接入位置及接入容量,缺乏DG并网对电压影响的机理性分析。

本文首先建立DG并网的基础模型,利用解析方法研究分布式电源接入位置、接入容量、接入方式和运行方式对配电网电压的影响机理;然后建立33节点系统的仿真算例,对前述机理分析结果进行验证;最后,通过总结分布式电源并网如何影响配电网电压分布,并给



谭瑾/高级工程师

关键词/Keywords

分布式电源·
配电网·
电压降落·
电压分布·
影响机理·

江苏省“六大人才高峰”项目资助,江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目资助(XTCX2017),国网江苏省电力公司重点科技项目(J2017076)。

出相应的电压改善措施。

1 DG接入对配电网电压影响

DG接入后的等效电路如图1所示。

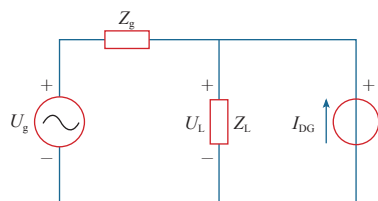


图1 DG并网结构示意图

未接入DG时, 负荷电压为

$$U_{L1} = \frac{U_g Z_L}{Z_L + Z_g} \quad (1)$$

接入DG后, 根据叠加定理, 负荷电压为

$$U_{L2} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_g} (U_g + Z_g I_{DG}) \quad (2)$$

式中, U_g 、 Z_g 分别为电网的电压和等效阻抗; U_L 、 Z_L 分别为负荷电压和阻抗, 用电流源来模拟DG电源; I_{DG} 为分布式电源的电流值; U_{L1} 、 U_{L2} 分别为DG接入前后的DG接入点电压值。

对比式(1)和式(2), 可知 $U_{L2} > U_{L1}$, 即DG并网后, 并网点处的电压将升高。由于分布式电源出力 and 负荷需求均表现为时变性、随机性和不确定性, 这将导致配电网节点电压变化较大, 在特殊情况下甚至造成节点电压的越限: DG出力大且轻负载时, 并网点电压有越上限的风险; 相反, DG出力很小且重负载时, 线路节点电压可能越下限。

电压发生连续改变或者快速变动时即出现电压波动, 而电压闪变则为人对于因电压波动引起的灯光闪烁的主观感觉参数。电压波动与闪变主要发生在配电系统中, 由冲击或波动性负荷、短路故障、雷击、备用电源或分布式电源自动投切引起, 会干扰对电压敏感的仪器仪表正常使用。电压暂降是指供电电压有效值由于电源或负载的变化使其在短时间内很快降落然后又处于正常值的现象, 当DG渗透率很高、规模很大时, DG的突然减少或者失去容易造成电压暂降, 严重影响电压质量和电压稳定性。

2 DG并网对线路电压分布的影响

我国的配电网一般呈辐射状链式结构, 沿着线路上分布着负荷, 在稳态运行状态下, 潮流总是沿着配电网线路单向传输^[15]。当有分布式电源并网时, 电网由原来的单电源辐射状供电结构变为多电源供电结构, 从而引起配电网潮流大小和方向发生变化, 对电网电压质量和稳定性造成一定程度的影响^[16]。图2为含有 N 个节点的配电网馈线模型, 设节点 n ($n=1, 2, \dots, N$) 的负荷为 $P_n + jQ_n$, 线路首端电压为 V_0 (常数), 节点 n 的电压为 V_n , 节点 $n-1$ 和节点 n 之间的支路阻抗为 $Z_{n-1,n} = R_{n-1,n} + jX_{n-1,n} = l_{n-1,n}(r + jx)$, $l_{n-1,n}$ 为该段线路的长度, r 、 x 分别为线路单位长度的电阻和电抗, $P_{DG,n}$ 为节点 n 处接入DG的容量。

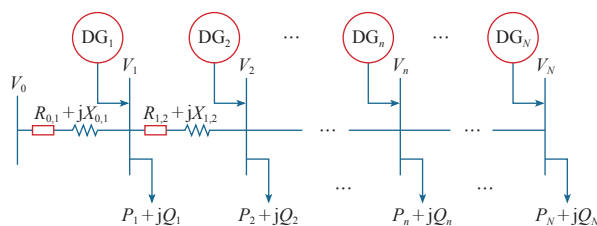


图2 含DG的配电网

2.1 DG集中并网对线路电压分布的影响

1) DG并网前, 忽略线路损耗时, 任意的节点 $n-1$ 与节点 n 之间的电压降为

$$\Delta V_{n-1,n} = V_{n-1} - V_n = \frac{\sum_{i=n}^N P_i r + \sum_{i=n}^N Q_i x}{V_{n-1}} l_{n-1,n} \quad (3)$$

节点 n 处电压为

$$V_n = V_0 - \sum_{j=1}^n \Delta V_{j-1,j} = V_0 - \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=j}^N P_i r + \sum_{i=j}^N Q_i x}{V_{j-1}} l_{j-1,j} \quad (4)$$

因为 $\sum_{i=n}^N P_i \geq 0$, $\sum_{i=n}^N Q_i \geq 0$, 所以 $\Delta V_{n-1,n} > 0$, 即

沿着潮流传输方向, 由线路始端到末端电压逐渐降低。由于配电网中的 R/X 值较大, 若线路供电功率因数很高时, 可忽略无功引起的电压降, 则节点 n 和节点 $n-1$ 之间的电压降为

$$\Delta V_{n-1,n} = \frac{\sum_{i=n}^N P_i r}{V_{n-1}} l_{n-1,n} \quad (5)$$

节点 n 处的电压为

$$V_n = V_0 - \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=j}^N P_i r}{V_{j-1}} l_{j-1,j} \quad (6)$$

2) DG并网后, 设线路供电功率因数很高, 忽略无功引起的电压降, DG集中接入点 (设为 k 点) 之前的节点 ($0 < n \leq k$) 电压为

$$V_n = V_0 - \sum_{j=1}^n \frac{\left(\sum_{i=j}^N P_i - P_{DGk} \right) r}{V_{j-1}} l_{j-1,j} \quad (7)$$

节点 n 和 $n-1$ 之间的电压降为

$$\Delta V_{n-1,n} = \frac{\left(\sum_{i=n}^N P_i - P_{DGk} \right) r l_{n-1,n}}{V_{n-1}} \quad (8)$$

并网点之后的节点 ($k < n < N$) 电压为

$$V_n = V_0 - \sum_{j=1}^k \frac{\left(\sum_{i=j}^N P_i - P_{DGk} \right) r l_{j-1,j}}{V_{j-1}} - \sum_{j=k+1}^n \frac{\sum_{i=j}^N P_i r l_{j-1,j}}{V_{j-1}} \quad (9)$$

节点 n 和节点 $n-1$ 之间的电压降为

$$\Delta V_{n-1,n} = \frac{\sum_{i=n}^N P_i r l_{n-1,n}}{V_{n-1}} \quad (10)$$

由式 (5) ~ 式 (10) 可知, DG并网引起了各节点电压不同程度的提高, 但对于DG并网点前后电压降落影响不同: DG并网点之前电压降落取决于DG的输出功率; DG并网点后的电压降落幅度与DG出力无关, 总是呈现下降趋势。

综上所述, 分布式电源集中并网后, DG的接入容量和接入位置将影响线路首端到末端各节点电压的分布规律: ①当DG集中接入到馈线首端时, 顺着传输功率的方向各节点电压逐渐降低; ②当DG集中接入馈线中端, 若馈线较长、且线路前段负载较重, 则电压先下降后上升, 在DG接入点处上升至最大值, 之后再逐渐降低; 若线路较短、且轻载运行时, 电压先上升后下降, DG接入点处电压达到整条馈线的最大值; ③当DG集中接

入到线路末端时, 馈线电压通常先下降后上升。后两种情况下, 并网点的电压均形成局部极大值, 当DG受环境影响输出功率较大且系统负载较轻时, 会加剧DG并网点的电压升高, 易造成电网设备及用户仪器仪表损坏。因此, 应当合理配置DG接入容量及接入位置, 保证电压质量。同时, 在保证电压合格的前提下, DG接入位置的优化也可以提高系统DG的准入容量。

2.2 DG分散并网对线路电压分布的影响

假设各节点都有DG接入, 忽略线路损耗, DG接入后线路节点电压为

$$V_n = V_0 - \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=j}^N (P_i - P_{DGi}) r l_{j-1,j}}{V_{j-1}} \quad (11)$$

节点 n 和节点 $n-1$ 之间的电压降为

$$\begin{aligned} \Delta V_{n-1,n} &= V_{n-1} - V_n \\ &= \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=j}^N (P_i - P_{DGi}) r l_{j-1,j}}{V_{j-1}} - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\sum_{i=j}^N (P_i - P_{DGi}) r l_{j-1,j}}{V_{j-1}} \\ &= \frac{\sum_{i=n}^N (P_i - P_{DGi}) r l_{n-1,n}}{V_{n-1}} \end{aligned} \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 当多个DG分散接入电网时, 相当于减少各节点接入的净负荷, 提高各节点电压水平。若DG容量配置不合理, 造成负的净负荷, 则可能会放大馈线节点间净负荷容量的差距, 造成馈线电压更为复杂的分布规律, 在馈线上出现多个电压的极大或极小值, 增大馈线电压的控制难度。反之, 若合理规划各节点DG容量, 使之与负荷需求平衡, 则既能降低线路上的传输功率, 减少线损, 又可有效避免电压越限, 提高配电网供电可靠性。本节分析同样适用于某些节点没有DG接入的情况, 此时 $P_{DGn} = 0$ 。

2.3 DG供电功率因数对线路电压分布的影响

在配电网运行中, 用功率因数来表示DG输出的视在功率被利用的效率, 一般越大越好。当电源的功率因数很大时, 电网中将有很少的无功功率, 大多数的视在功率将被用来提供有功功率,

可以有效提高输电效率^[17]。下文分析DG以不同功率因数集中接入节点*k*时对电压分布的影响，DG并网点*k*处的电压为

$$V_k = V_0 - \sum_{j=1}^k \Delta V_{j-1,j}$$

$$= V_0 - \sum_{j=1}^k \frac{\left(\sum_{i=j}^N P_i - P_{DGk} \right) r + \left(\sum_{i=j}^N Q_i - Q_{DGk} \right) x}{V_{j-1}} l_{j-1,j} \quad (13)$$

设DG的功率因数为 α ，DG的视在功率为 S_{DGk} ，则DG输出的有功功率为 $P_{DGk} = \alpha S_{DGk}$ ，DG输出的感性无功功率为 $Q_{DGk} = \sqrt{1-\alpha^2} S_{DGk}$ ，DG输出的容性无功功率为 $Q_{DGk} = -\sqrt{1-\alpha^2} S_{DGk}$ ，则节点*k*相对于首节点的电压降 ΔV_{0k} 为

$$\Delta V_{0k} = \sum_{j=1}^k \frac{r \sum_{i=j}^N P_i + x \sum_{i=j}^N Q_i}{V_{j-1}} l_{j-1,j} - \frac{S_{DGk} (r\alpha \pm x\sqrt{1-\alpha^2})}{V_{k-1}} \quad (14)$$

上式表明，同容量的分布式电源以不同功率因数接入电网中时，功率因数越大，DG提供的无功功率越小。当DG以超前功率因数接入电网时，功率因数越小，DG吸收的无功越多，并网点电压降低越明显；当DG以滞后功率因数接入配电网中时，功率因数变化对并网点处的电压影响取决于线路的阻抗比 K ($K=r/x$)，当线路的阻抗比 $K < 1$ 时，无功功率对并网点处电压的灵敏度大，功率因数越小，DG向电网中输送的无功功率越多，并网点处的电压越高；反之，当线路中的阻抗比 $K > 1$ 时，有功功率对并网点处电压的灵敏度大，功率因数越大，DG向电网中输送的有功功率越多，并网点处的电压越高。

3 算例分析

以图3所示33节点配电网系统^[18]为对象进行仿真验证，节点编号为 $N_0 \sim N_{32}$ ，系统基准电压为10 kV，设系统母线 N_0 为DG节点，电压为1.05 (pu)，总负荷为3.175 MW + j2.3 Mvar，利用电力系统仿真软件DiGSILENT/Power Factory^[19]构建系统仿真模型，选取光伏电源 (PV) 作为分布式电源，检验其不同接入方式对系统电压的影响。

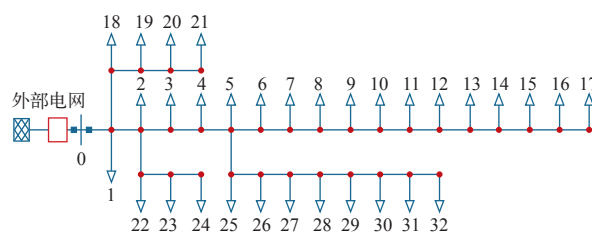


图3 33节点配电网系统

3.1 DG接入位置对配电网电压的影响

将容量为2.0 MV·A、功率因数为1的DG依次集中接入33节点的主馈线节点 $N_1 \sim N_{17}$ 上，潮流计算后，各节点电压变化如图4所示。

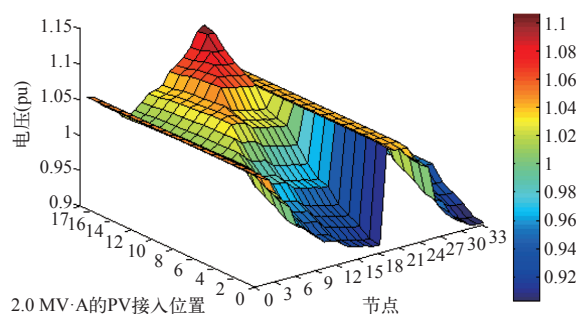


图4 DG接入位置对节点电压的影响

为反映DG接入电网前后馈线上所有节点电压变化的总趋势，定义馈线电压总体变化指标 ΔV_b 为

$$\Delta V_b = \sum_{i=0}^n |V_{DG_i} - V_i| \quad (15)$$

式中， V_{DG_i} 为接入DG后的节点*i*的电压； V_i 为未接入DG时节点*i*的电压。图3系统中，随着DG接入位置的变化，各支路节点电压较未接入DG时的总体变化指标如下表所示。

表 各支路整体电压变化

DG接入位置	支路节点 $N_0 - N_{17}$	支路节点 $N_{18} - N_{21}$	支路节点 $N_{22} - N_{24}$	支路节点 $N_{25} - N_{32}$
0	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00
1	0.025 13	0.005 43	0.004 14	0.012 26
2	0.153 93	0.020 47	0.026 63	0.078 67
3	0.244 23	0.020 82	0.027 09	0.127 95
4	0.333	0.021 15	0.027 52	0.179 44
5	0.515 08	0.021 92	0.028 52	0.292 06
6	0.552 38	0.022 01	0.028 63	0.293 30
7	0.675 06	0.022 07	0.028 71	0.294 15
8	0.831 38	0.022 04	0.028 68	0.293 81

(续)

DG接入位置	支路节点 N_0-N_{17}	支路节点 $N_{18}-N_{21}$	支路节点 $N_{22}-N_{24}$	支路节点 $N_{25}-N_{32}$
9	0.969 89	0.021 98	0.028 59	0.292 87
10	0.992 63	0.021 96	0.028 57	0.292 65
11	1.029 84	0.021 92	0.028 52	0.292 13
12	1.147	0.021 68	0.028 21	0.288 8
13	1.178 76	0.021 56	0.028 05	0.286 95
14	1.203 49	0.021 4	0.027 84	0.284 75
15	1.223 17	0.021 2	0.027 58	0.281 92
16	1.227 8	0.020 71	0.026 95	0.274 93
17	1.221 96	0.020 55	0.026 74	0.272 57

由图4及上表可知, DG接入馈线首段节点时对线路电压的整体提升效果不明显, 末端电压仍可能越下限; DG接入馈线尾部节点时可以有效提高接入点及附近节点电压, 但当接入的DG容量很大时, 易引起接入点附近局部过电压, 即将同等容量的DG从馈线首段移至馈线尾部时, 系统可能由电压正常转为馈线尾部电压越上限, 可知从电压安全的角度, 馈线前段对大容量DG的接纳能力更强, 而馈线尾部接入适中容量的DG对馈线整体电压降落的改善更有效。因此, 合理地选择DG接入位置才能提高电压质量和DG准入容量。忽视线路各节点DG准入容量的限制仅根据电压灵敏度选择末端节点或电压最低点来安装DG提高电压是不可取的。

3.2 DG接入容量对配电网电压的影响

DG接入节点 N_{13} , 功率因数为1, 为反映DG不同接入容量对配电网电压的影响, 将DG容量按每次 $0.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的增幅从零递增至 $2.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 各节点电压随DG接入容量的变化规律如图5所示。

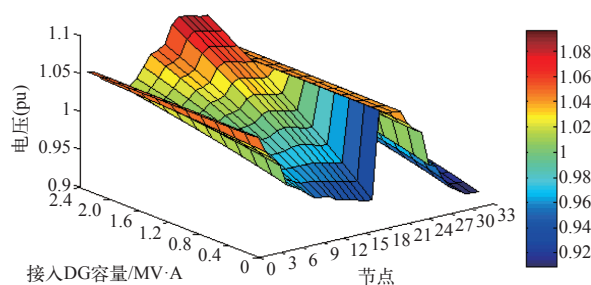


图5 DG接入容量对节点电压的影响

由图5可知, 当线路上无DG接入配电网时, 线

路末端节点电压越下限; 当节点 N_{13} 接入 $0.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 容量的DG时对电压分布的影响较小, 整体电压水平沿着线路传输的方向仍然是下降的, 但DG的接入减缓了接入点的电压降落; 随着DG接入容量的逐渐增大, 当节点 N_{13} 接入 $1.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 容量的DG时明显改善线路末端电压水平, 使各节点电压均在允许的电压偏差范围内; 当节点 N_{13} 接入 $2.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 容量的DG时, 电压整体水平抬高效果最明显, 馈线电压分布呈现先下降后上升再下降的趋势, 并且DG接入点处电压提升幅值更大, 出现局部过电压情况。因此, 为防止轻载运行时DG接入容量过大引起电压越上限, 系统规划过程中应该优化系统各节点的DG准入容量。

3.3 DG接入方式对配电网电压的影响

本节主要对比DG集中和分散两种接入方式对线路各节点电压的影响。集中方式下, 将容量为 $2.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、功率因数为1的单台DG依次接入 $N_1 \sim N_{17}$ 中的9个奇数节点上; 分散方式下, 将12个单台容量为 $0.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、功率因数为1的DG随机分散接入到节点 $N_1 \sim N_{17}$ 上。两种接入方式下各节点的电压如图6所示。

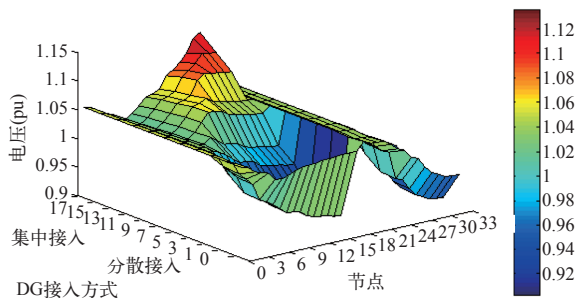


图6 DG接入方式对节点电压的影响

DG以集中方式接入线路各节点时, 根据上述DG集中接入的位置和容量不同, 各节点电压差异大, 整体电压分布不均衡, DG或负荷的随机变化容易引起局部电压越上限或越下限问题。图6中, 若将相同容量的DG由集中式接入转变为分散式接入到馈线的各个节点上, 电压分布曲线比DG接入线路首端时电压高, 比接入线路末端的电压分布曲线低, 既能够明显提高线路各节点电压, 并且各节点电压差异小, 电压整体分布均衡, 不仅能

够减少线路损耗,还能更好地应对负荷和DG随机变化,提高整条馈线的接纳容量。

3.4 DG运行方式对配电网电压的影响

用DG功率因数变化来反映其运行方式的改变,选取节点 N_{17} 作为分布式电源集中接入点,DG的总容量为 $1.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$,功率因数分别设置为 $\cos\varphi=0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95$ (超前), $\cos\varphi=1$ 和 $\cos\varphi=0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95$ (滞后),各节点电压的变化如图7所示。

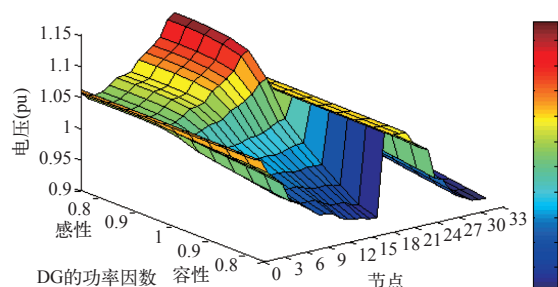


图7 DG运行方式对节点电压的影响

由图7可知,DG依次以超前0.75到滞后0.75的功率因数接入配电网时,DG接入点处的电压逐渐增大。功率因数由超前0.75到1的过程中,DG从接入点处吸收的无功功率逐渐减小,系统的无功增加使DG接入点的电压逐渐升高;功率因数由1变化到滞后0.75时,DG向配电网中输送的无功逐渐增多,系统的无功增加使DG接入点的电压逐渐升高。因此,在用电高峰期,电压低于正常限值时,DG的有功出力不足,降低DG的功率因数可以有效地提高线路电压;反之,系统轻载运行时,为了减少弃光、弃风,提高分布式电源的有效利用率,DG采用超前功率因数运行,向电网中吸收无功功率,使DG尽可能多地向电网中输出有功功率而不会使DG接入点电压越上限。

4 结束语

DG并网可以有效提高馈线电压整体水平,改善电压质量和电压的可靠性,但DG接入位置、接入容量、接入方式和运行方式对电压的影响程度不同。针对以上情况研究DG并网对节点电压的影响机理,并进行仿真验证,得出以下结论。

1) 等容量的DG接入配电网不同位置时电压提升效果不同,DG接入点越靠近线路末端,该支路整体电压提高越显著,由于DG出力的不确定性,末端电压支撑性差,限制了大容量的DG并网。所以,分布式电源越靠近末端,对配电网电压分布的影响越大。

2) 当大容量DG接入配电网时,DG多点分散并网对各节点的电压稳定性优于DG集中并网,且各节点之间的电压降落和线损都小于DG集中并网。因此,大容量DG的接入宜采用多点分散接入。

3) 适当降低分布式电源并网的滞后功率因数可以有效提高线路各节点电压,而分布式电源以超前功率因数运行时可以提高DG的准入容量。因此,DG以滞后功率因数运行比超前功率因数运行对线路电压提升效果更好,电压以超前功率因数运行时可提高DG准入容量,提高用电设备对电能的利用率。

分析了DG不同方式并网对接入支路各节点电压的影响,并未涉及到该支路上的DG变化对相邻支路节点电压的影响,在DG分散接入配电网时的接入容量配置方面还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 张柏泉,杨宜民.风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J].中国电力,2006,39(6):65-69.
- [2] 刘吉臻.大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J].中国电机工程学报,2013,33(16):1-8.
- [3] 李景明,王红岩,赵群.中国新能源资源潜力及前景展望[J].天然气工业,2008,28(1):149-153.
- [4] 雷金勇,李战鹰,卢泽汉,等.分布式发电技术及其对电力系统影响研究综述[J].南方电网技术,2011,5(4):46-50.
- [5] 谷永刚,王琨,张波.分布式发电技术及其应用现状[J].电网与清洁能源,2010,26(6):38-43.
- [6] 马钊,刘颖异,尚宇炜,等.CIGRE 2016未来电力系统及主动配电系统技术新动向[J].中国电机工程学报,2017,37(1):27-36.

(下转第24页)

- [6] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (8): 22-27.
- [7] 芦思为, 黄彦全, 沈金锁, 等. 含冷热电联产的微电网经济运行控制策略的研究 [J]. 电气应用, 2017, 36 (6): 26-31.
- [8] 柳川, 王宇拓, 王林川, 等. 含冷热电联供系统微电网优化运行研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (2): 31-37.
- [9] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 32 (20): 82-87.
- [10] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 33 (6): 8-14.
- [11] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (15): 3785-3793.
- [12] Liu Mingxi, Shi Yang, Fang Fang. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers [J]. Applied Energy, 2012, 95: 164-173.
- [13] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (31): 26-33.
- [14] 游大宁, 夏滨, 殷红旭, 等. 含不同类型分布式电源的配电网潮流计算 [J]. 电气应用, 2017, 36 (11): 18-23.
- [15] Gua Qunying, Ren Hongbo, Gao Weijun, et al. Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai [J]. Energy and Buildings, 2012, 51: 143-152.
- [16] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分 [J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 39-40.
- (收稿日期: 2017-11-21) **EA**

(上接第17页)

- [7] 李黎. 分布式发电技术及其并网后的问题研究 [J]. 电网与清洁能源, 2010, 26 (2): 55-59.
- [8] Xu Xiaoyan, Huang Yuehui. Impact of dispersed PV generation on voltage rise of distribution grid [C]. International Conference on Power System Technology, 2010: 1-6.
- [9] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配电网供电电压质量的影响和改善 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 152-157.
- [10] 何昌奇, 邵龙, 高杨, 等. 分布式电源并网后对电压分布影响的研究 [J]. 中国电力, 2014, 47 (5): 88-92.
- [11] 陈洪安琪. 分布式电源对配电网的影响及解决措施研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [12] Teng J H, Luor T S, Liu Y H. Strategic distributed generator placements for service reliability improvements [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 21-25 July, 2002: 719-724.
- [13] Brown R E, Pan Jiuping, Feng Xiaoming, et al. Sitting distributed generation to defer T&D expansion [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 28 Oct-2 Nov, 2001: 622-627.
- [14] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (6): 120-125.
- [15] 祖友华. 分布式电源并网及其对电网的影响 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [16] 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): 84-88.
- [17] 方恒福, 朱军, 王金丽, 等. 功率因数对电压质量的影响 [J]. 农村电气化, 2012 (7): 5-7.
- [18] 孟庭如. 含有分布式电源的配电网调压方案研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [19] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于DIGSILENT的并网光伏发电系统的建模与仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (3): 49-55.
- (收稿日期: 2017-08-24) **EA**