

电压约束条件下分布式光伏接入 低压配电网特性研究

从理论上分析了单个分布式光伏电源集中接入和多个分布式光伏电源分散接入低压配电网后配电网馈线节点电压变化机理,给出以静态电压限值为约束的接入容量极限。探讨了影响低压配电网静态电压变化的各种因素,如光伏接入位置、接入形式、出力大小、电网线路参数和负荷大小及特性等。运用PSCAD/EMTDC电磁暂态软件搭建了分散光伏发电多点接入低压配电网的系统模型。结合仿真算例验证了上述分析的正确性,修正了不同线路长度接入容量方案,并提出了解决分布式光伏发电和负荷网源不协调工作引起的电压偏差的措施和方案。

程孟增 张明理 梁毅 张子信 刘凯/国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院

0 引言

由于分布式光伏接入配电网将改变传统配电网的辐射式配电方式,配电网电压管理问题是大规模分布式光伏发电发展的最大挑战之一^[1-4]。为保证配电网的可靠运行,一般采用严格限制分布式光伏发电接入容量,并对接入实施严格规范的方法^[5-6]。

当配电网中包含有分布式时,配电网中的功率流向就不再单一了,即改变了传统配电网的潮流,这种由于分布式的接入而使功率流向变为双向的配电系统,成为主动配电网系统。其核心是分布式可再生能源从传统的被动消纳转变为主动引导与利用。新型主动配电网通过对分布式光伏发电、储能以及负荷进行联合调控,减小分布式光伏发电对配电网造成的不利影响,从而提高配电网接纳分布式光伏发电的能力,被认为是解决分布式光伏发电接入问题的有效途

径^[7-8]。

新型配电网中接入分布式电源后,和传统的配电网存在有较大的差异,新型配电网系统除包含有配电装置、线路以及电力负载等传统配电网中包含的设备外,最大的特点是接入了容量比较小的分布式发电装置^[9]。这种分布式发电装置一般可在电力用户处建设安装,因此省去了不必要的输电损耗,提高分布式电源的利用率;并且具有就近提供有功功率、就近补偿无功功率的功能,但随着分布式光伏容量接入增大,分布式出力波动将使配电网电压发生较大的波动^[10-11]。

文献[12]阐述了分布式电源接入配电网后对配电网产生的影响,主要包括对配电网电压的影响,对系统电压稳定性的影响,对配电网供电可靠性的影响。文献[13]采用基于遗传学的蚁群优化算法,确定分布式电源的最佳接入容量。文献[14]提出了考虑电压调整约束后的准入功率优化计算模型,以确定不需改变配电网结构和设备前提下分布式发电的准入容量,但在实际电网中,规划分布式光伏如建筑光伏时并没有考虑电网的情况,但有可能需对电网结构、设备进行调整。文献[15]研究了分布式发电中风力发电和光伏发电随机出力对配电网电压质量的影响,得到了节点电压概率密度曲线及年期望电压越限时间。

本文以配电网66 kV台区下10 kV/380 V线路为例,说明分布式光伏发电接入对配电网电压的影响。对单个光伏发



程孟增/高级工程师

关键词/Keywords

光伏发电·
低压配电网·
馈线电压·
电压波动·
PSCAD/EMTDC·

电和多个光伏发电分散接入配电网电压变化机理进行分析,以指导满足电压偏差时光伏发电接入容量的合理范围,并提出光伏发电容量超出最大值时,保证满足电压偏差要求需要采取的措施。文中搭建了光伏发电系统和配电系统模型,从稳态分析和动态分析两个方面,研究不同接入容量、不同位置和不同负荷特性下,大规模光伏发电系统对配电系统电压的影响,并与理论分析结果进行比较。最终,根据计算分析结果,提出了相应的改善措施与建议。

1 光伏接入配电系统影响机理分析

图1为光伏发电接入的典型低压配电网线路分布图。整个配电台区为66 kV/10 kV/380 V电压等级,分布式电源接入配电网10 kV/380 V线路中。分布式光伏向配电网注入有功功率的同时,必将影响到主动配电网各个节点的电压,对电压具有一定的抬升作用,可能导致节点电压抬升越限。当某条馈线有 N 个节点,每个节点均接有负荷和分布式电源。图1中, S_0 为无穷大电源; (r, x) 为1 km单位线路长度阻抗; l_i 为第 i ($i=1,2,3,\dots,N$)段线路长度; (P_i+jQ_i) 为节点 i 的负荷功率; $(P_{vi}+jQ_{vi})$ 为第 i 个节点上分布式光伏电源输出功率; S_{Ti} 为10 kV/380 V分布式光伏接入电网变压器。分布式光伏发电有自发自用和全部上网两种形式。

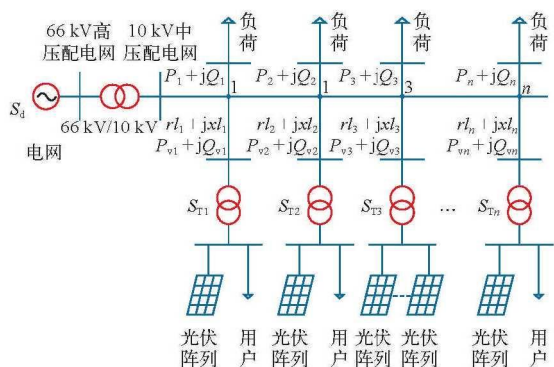


图1 含分布式光伏电源的主动配电网模型

1.1 分布式光伏接入前配电网馈线电压分析

PV接入之前,两个节点 m 和 $m-1$ 之间的电压降为

$$\Delta V_m = V_m - V_{m-1} = - \frac{\sum_{i=m}^N P_i R_m + \sum_{i=m}^N Q_i X_m}{V_{m-1}} = - \frac{\sum_{i=m}^N P_i r l_m + \sum_{i=m}^N Q_i x l_m}{V_{m-1}} \quad (1)$$

节点 m 处的电压为

$$V_m = V_0 + \sum_{n=1}^m \Delta V_n = V_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{i=n}^N P_i r l_n + \sum_{i=n}^N Q_i x l_n}{V_{n-1}} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中符号代表的含义与图1中描述相同。

根据分布式发电技术要求,分布式电源可以运行在不同输出功率因数下,其可以向系统发出无功功率,也可以从系统吸收无功功率。当分布式电源发出无功功率(或者从系统吸收无功功率,即发出负无功功率)较大,馈线电抗较大时(大截面积、远距离架空线馈线电抗较大),则分布式电源发出无功功率对配电网电压的影响不可忽略。

1.2 单点分布式光伏发电接入配电后电压分析

光伏接入点(设为 p 点)时,用户位于光伏接入点前 m 点($0 < m < p$)电压为

$$V_m = V_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\left(\sum_{i=n}^N P_i - P_{vp} \right) r l_n + \left(\sum_{i=n}^N Q_i - Q_{vp} \right) x l_n}{V_{n-1}} \quad (3)$$

式中, P_{vp} 、 Q_{vp} 为第 p 点用户接入光伏发电的容量。

第 m 户和第 $m-1$ 户之间的电压差为

$$\Delta V_m = V_m - V_{m-1} = - \frac{\left(\sum_{i=m}^N P_i - P_{vp} \right) r l_m + \left(\sum_{i=m}^N Q_i - Q_{vp} \right) x l_m}{V_{m-1}} \quad (4)$$

如下式所示

$$\sum_{i=m}^N P_i r l_m + \sum_{i=m}^N Q_i x l_m > P_{vp} r l_m + Q_{vp} x l_m \quad (5)$$

当式(5)成立时,即 m 户与后面所有用户功率之和大于光伏发电容量时, $\Delta V_m < 0$,电压降低。

如下式所示

$$\sum_{i=m}^N P_i r l_m + \sum_{i=m}^N Q_i x l_m < P_{vp} r l_m + Q_{vp} r l_m \quad (6)$$

当式(6)成立时,即 m 户与后面所有用户功率之和小于光伏发电容量时, $\Delta V_m > 0$, 电压升高。

光伏接入点, 用户位于光伏接入点前 m 点的 ($p < m < N$) 电压为

$$V_m = V_0 - \sum_{n=1}^p \frac{\left(\sum_{i=n}^N P_i - P_{vp} \right) r l_n + \left(\sum_{i=n}^N Q_i - Q_{vp} \right) x l_n}{V_{n-1}} - \sum_{n=p+1}^m \frac{\sum_{i=n}^N P_i r l_n + \sum_{i=n}^N Q_i r l_n}{V_{n-1}} \quad (7)$$

两节点之间的线路电压降为

$$\Delta V_m = V_m - V_{m-1} = \sum_{n=p+1}^{m-1} \frac{\sum_{i=n}^N P_i r l_n + \sum_{i=n}^N Q_i r l_n}{V_{n-1}} - \sum_{n=p+1}^m \frac{\sum_{i=n}^N P_i r l_n + \sum_{i=n}^N Q_i r l_n}{V_{n-1}} = - \frac{\sum_{i=m}^N P_i r l_m + \sum_{i=m}^N Q_i r l_m}{V_{m-1}} \quad (8)$$

如果节点 m 处没有大量容性无功功率, 节点 m 处电压比 $m-1$ 处电压要小。

通过上述分析可知, 配电网中任何一点接入分布式电源, 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抬升, 且越靠近电源端的节点, 抬升量越大。在不改变其他运行条件时, 分布式电源接入位置越靠近末端, 对电压损失的补偿作用越强, 对馈线电压支撑作用也就越强。

1.3 多点分布式光伏发电分散接入配电后电压分析

同理, 与单点光伏接入相类似, 多点光伏发电接入配电网后, m 点电压为

$$V_m = V_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{i=n}^N (P_i - P_{vi}) r l_n + \sum_{i=n}^N (Q_i - Q_{vi}) x l_n}{V_{n-1}} \quad (9)$$

第 m 点和第 $m-1$ 点之间的电压差为

$$\Delta V_m = V_m - V_{m-1} = \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\sum_{i=n}^N (P_i - P_{vi}) r l_n + \sum_{i=n}^N (Q_i - Q_{vi}) x l_n}{V_{n-1}} - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{i=n}^N (P_i - P_{vi}) r l_n + \sum_{i=n}^N (Q_i - Q_{vi}) x l_n}{V_{n-1}} = - \frac{\sum_{i=m}^N (P_i - P_{vi}) r l_m + \sum_{i=m}^N (Q_i - Q_{vi}) x l_m}{V_{m-1}} \quad (10)$$

式中, P_{vi} 、 Q_{vi} 为第 i 个用户接入光伏发电的容量。

通过式(10)可以看出, 假设用户消耗的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 均大于光伏发电功率 P_{vi} 和 Q_{vi} , ΔV_m 小于零。反之即 m 点和 m 点向后所有负荷有功功率之和小于所有光伏发电功率之和时, 电压升高, m 处电压比 $m-1$ 处电压要大, ΔV_m 大于零。

通过以上分析, 馈线电压之差与负荷大小光伏发出有功功率和无功功率都有关系。如果负荷和光伏发出有功功率确定情况下, 可以只改变光伏发出无功功率来改变节点和馈线电压分布。多点接入可以改变不同接入点有功功率和无功功率, 随着接入点和负荷接入点变化, 各节点电压变化不再是成单向性。

2 分布式光伏仿真系统建模

目前, 光伏并网发电系统主要由光伏模拟、变流器和电网主电路部分以及控制电路部分组成。光伏电池是一种非线性直流电源, 根据详细程度, 其数学模型可分为理想模型、单二极管模型和双二极管模型, 图2为光伏电池单二极管等效电路。

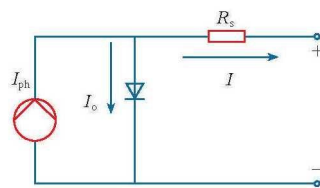


图2 光伏电池单二极管等效电路

一个理想的光伏电池, 在光照恒定时, 光生电流不随光伏电池的工作状态而变化, 因此在等

效电路中可以看作是一个恒流源。由等效电路可得出光伏电池的输出特性方程如下,即

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{AkT/q} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

式中, I_{ph} 为给定光照强度下的短路电流, 即

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{G}{G_{ref}} [1 + \alpha_T (T - T_{ref})] \quad (12)$$

式中, I_{sc} 为标准测试条件 $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ 、光照强度 $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ 下的短路电流; α_T 为在参考日照下的电流变化温度系数。

$$I_o = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) \exp \left[qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) / nk \right] \quad (13)$$

式中, I_{rs} 为额定温度下的太阳能电池二极管反向饱和电流; q 为电子电荷常数, 通常为 1.60×10^{-19} ; k 为波兹曼常数, 通常为 1.38×10^{-23} ; n 为二极管影响因子; E_g 为光伏电能带宽度。

光伏阵列是由多个光伏组件串并联组成, 从而提高了系统的电压和电流, 以此增加系统传输的功率。由 N_c 个组件串联, N_b 个组件并联组成的光伏阵列的输出电流可描述为

$$I = N_b I_{ph} - N_b I_o \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{N_c AkT/q} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

$$P = VI \quad (15)$$

从式 (14)、式 (15) 中可以看出, 光伏阵列的输出电流 I 与输出功率 P 随光伏阵列输出电压 V 的变化而变化。

分布式电源并网逆变器的控制方式多种多样, 目前应用较为广泛的主要是双环控制。在双

环控制系统中, 外环控制器主要用于体现不同的控制目的, 同时产生内环参考信号, 一般动态响应较慢。内环控制器主要进行精细的调节, 用于提高逆变器输出的电能质量, 一般动态响应较快。当逆变型分布式电源并网要求不高时, 也可以采用相对简单的控制方式, 即单独使用外环控制, 但此时并网的电能质量和响应速度并不是很理想, 因此目前应用较多的是双环控制方式, 如图3所示。

3 仿真结果及分析

以图1系统为算例, 仿真条件: 外部电路短路容量 S_d 为 $100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。母线额定电压 U_N 为 10.5 kV , 光伏电源功率因数为超前 0.98 。线路电压等级为 10 kV , 线路型号采用 $\text{LJG}-240$ 和 $\text{YJLV}-240$ 。线路上共有8个用户接入, 其中4个用户为 $10 \text{ kV}/380 \text{ V}$ 用电负荷用户。另外4个用户为光伏电源接入用户, 光伏性质为自发自用余电上网混合型光伏电源。

3.1 仿真算例1: 光伏接入不同位置对馈线电压分布的影响

算例1采用线路型号 $\text{YJLV}-240$, 线路阻抗 $0.125 + 0.08j \Omega/\text{km}$, 线路长度为 20 km 。线路有4个节点, 分别为节点1~4, 每个节点距变压器电气距离分别为 5 km 、 10 km 、 15 km 和 20 km 。光伏

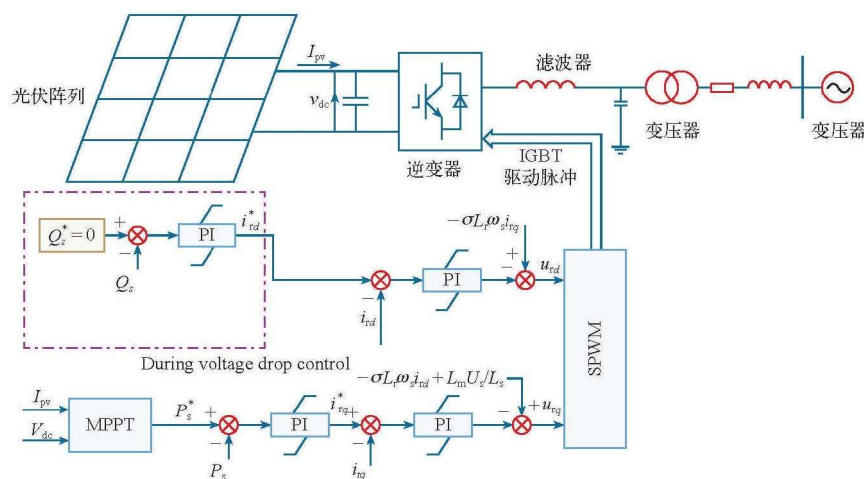


图3 单个光伏并网发电控制系统和电网拓扑结构图

接入容量为3 MW。假设主动配电网处在轻负荷运行情况,即用电负荷为零。在不改变其他运行条件下,改变分布式电源接入位置时,检测分布式电源接入对主动配电网电压分布的影响,如图4所示。

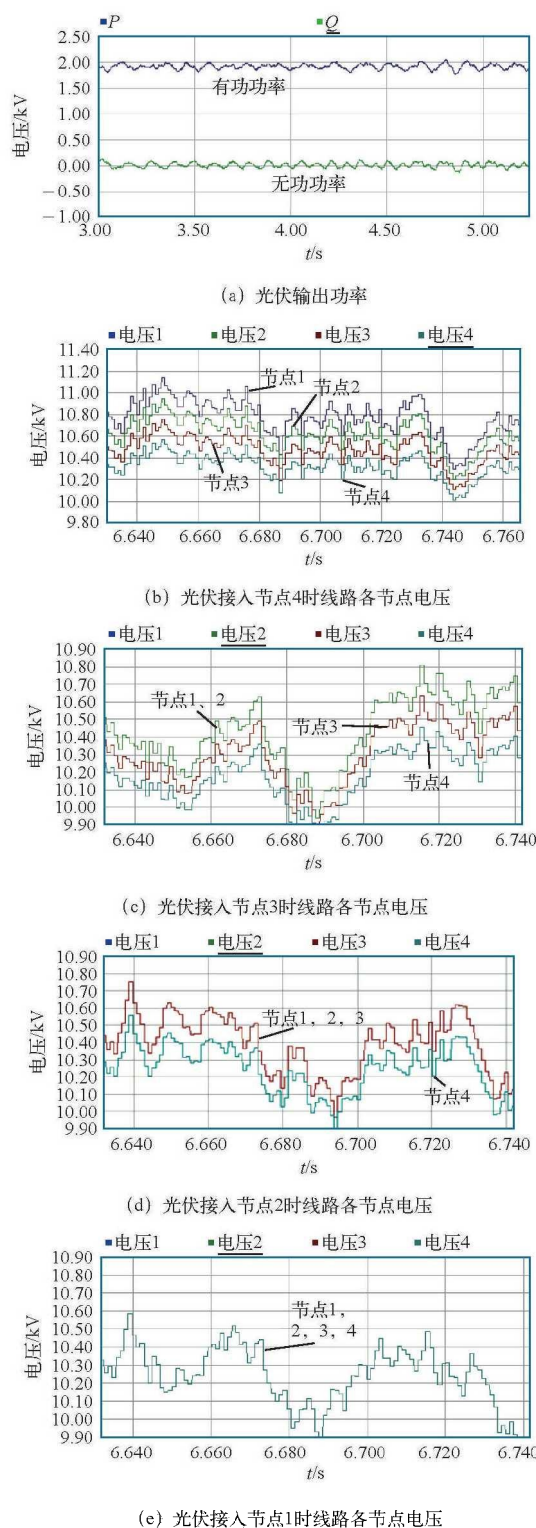


图4 光伏接入位置改变时主动配电网馈线电压变化图

图4表明,相同容量光伏发电接入位置不同对电压的影响不同。在节点1~4接入分布式电源时,光伏节点电压和光伏接入点以后的电压相同。配电网馈线上各节点电压均有提升,且馈线末端节点4的电压抬升量均大于馈线的其他节点。通过图4a可以看出,光伏输出有功功率为1.9 MW。通过图4b可以看出,节点4电压有效值为10.8 kV,节点3为10.7 kV,节点2电压为10.5 kV,节点1电压为10.4 kV。按照国标《电能质量供电电压偏差》中要求,节点4电压越限。通过图4c~e可以看出,光伏单独接入节点3,节点2和节点1时各节点电压低于光伏接入节点4的电压。所以光伏接入线路越短越有利于电压管理。

通过仿真结果综合验证了理论分析所得结论。

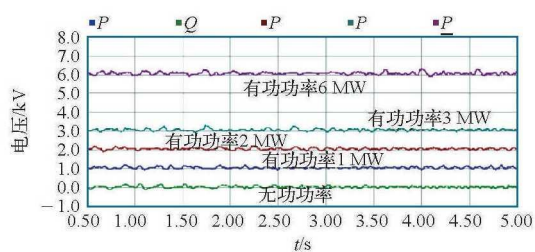
1) 配电网中任何一点接入分布式电源,都有助于减少馈线上的电压损失,对馈线电压有支撑作用,馈线上所有的节点电压都会有所抬升,且越靠近末端的节点,抬升量越大;从节点1~4随着接入位置越靠近馈线末端,馈线电压的抬升越明显。

2) 在不改变其他运行条件时,只改变光伏接入位置,分布式电源接入位置越靠近末端,光伏对馈线电压影响越大。

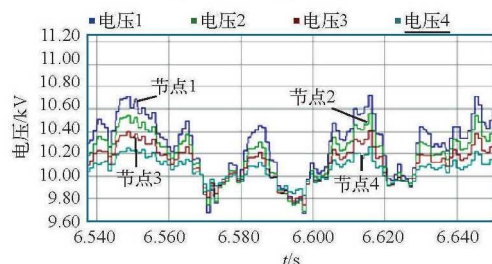
3.2 仿真算例2: 光伏接入容量对馈线电压分布的影响

算例2采用线路型号LGJ-240,线路阻抗为 $0.12 + 0.35j \Omega/\text{km}$,线路长度为20 km。在节点4接入分布式电源的容量依次接入 $P_1 = 1 \text{ MW}$, $P_2 = 2 \text{ MW}$, $P_3 = 3 \text{ MW}$, $P_4 = 6 \text{ MW}$ 。在不改变其他运行条件时,观测分布式电源接入容量对配电网电压带来的影响。

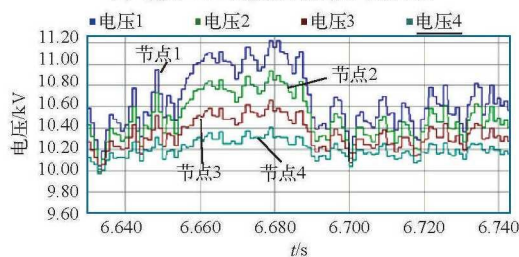
仿真结果如图5a~e所示。光伏接入节点4、容量为1 MW时,节点1~4都不超过标准电压,电压有效值在10.4 kV以下。由图5c可以看出,接入2 MW时,节点4电压有效值可达到10.6 kV,已到达静态电压稳定极限值。图5d为节点4电压越限。图5e为节点3、节点4静态电压越限。通过仿真得出主要结论:在不改变其他运行条件时,分布式



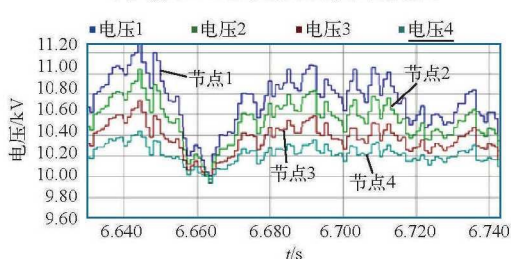
(a) 光伏发电输出功率



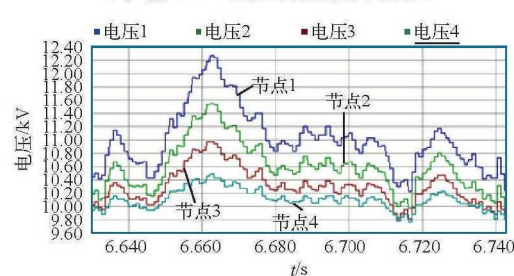
(b) 接入1 MW光伏发电线路各节点电压



(c) 接入2 MW光伏发电线路各节点电压



(d) 接入3 MW光伏发电线路各节点电压



(e) 接入6 MW光伏发电线路各节点电压

图5 光伏接入容量改变时主动配电网馈线电压变化图

电源接入容量越大，对馈线电压的抬升作用越明显。20 km LGJ-240线路，馈线末端接入分布式光伏的极限容量为1.9~2.1 MW。

3.3 仿真算例3：分散分布式光伏接入对配电网馈线电压分布的影响

算例3采用线路型号LGJ-240，线路阻抗为 $0.12 + 0.35j \Omega/\text{km}$ ，线路长度为20 km。节点1~4分别接入分布式光伏。在不改变其他运行条件时，观测分布式电源接入后对配电网电压带来的影响，如图6所示。

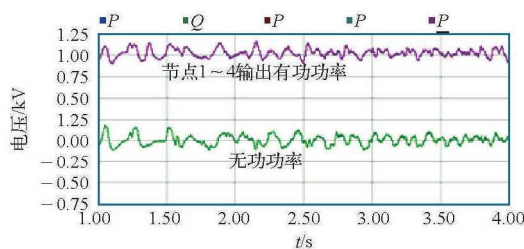
1) 各节点输出1 MW有功功率。

2) 节点1~4接入分布式电源的容量均为1 MW，负荷为轻载情况，即0 MW。

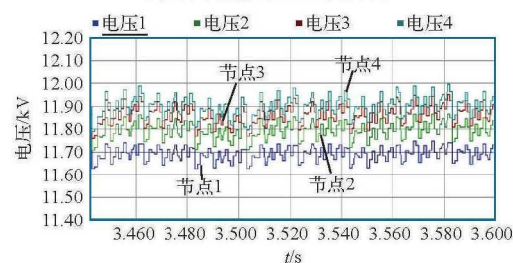
3) 节点1~4接入分布式电源的容量均为1 MW，节点1、节点3和节点4接入负荷均为1.2 MW·A，负荷功率因数为0.9。

4) 节点1~4接入分布式电源的容量均为0.5 MW，节点1、节点3和节点4接入负荷均为1.2 MW·A，负荷功率因数为0.9。

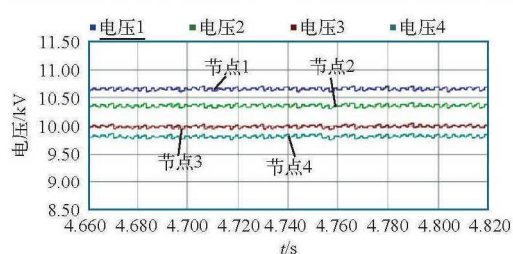
由图6a可以看出，各节点输出功率相同，并且每个模块输出功率稳定。图6b为分散接入分布



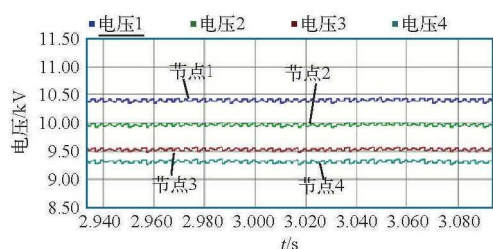
(a) 各节点输出1 MW有功功率



(b) 负载为零且每个节点接入1 MW光伏时线路各节点电压变化



(c) 负载为3.6 MW·A且每个节点接入1 MW光伏时各节点电压变化



(d) 负载为 $3.6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 且每个节点接入 0.5 MW 光伏时各节点电压变化

图6 光伏发电分散多点时主动配电网馈线电压变化图

式光伏总计为 4 MW ，节点2~4均超过静态电压限值，与图3d相比，分散接入各节点电压波动更为均衡。图6c与图6b相比，分布式光伏接入容量不变情况下，接入总计 $3.6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的用电负荷。节点1~4的节点电压均被限制在国标范围之内。此时靠近变台区，馈线越短电压越高，这与负荷分布有关。图6d与图6c相比，每个分布式光伏接入节点减小有功输出，均为 0.5 MW ，馈线总计 2 MW 的有功输出。此时节点电压降低，节点4电压为 9.4 kV ，达到静态电压下限。如分布式光伏继续降低输出功率，节点4电压会继续降低，进而出现低电压情况。解决此情况可以采取台区无功功率补偿，或者强制光伏发出无功功率来调节馈线电压。

4 结束语

分布式电源和多元化负荷大量接入低压配电网后，形成的网-源-荷为一体的新型低压配电网。本文对分布式光伏接入低压配电网后，分布式电源出力大小对配电网馈线节点电压进行了研究，考虑了以电压为约束条件下的电网结构参数、接入容量和负荷特性等综合因素对电网静态电压的影响。应用PSCAD/EMTDC电磁暂态软件建立了 $66 \text{ kV}/10 \text{ kV}$ 台区模型，结合工程常用 10 kV 架空线路和电缆线路具体参数建立不同馈线模型，以及分散的分布式光伏及其控制系统模型。理论分析了光伏有功功率和无功功率出力特性以及接入馈线负荷特对电压的影响。研究了分布式电源接入位置、接入容量和运行方式对低压配电网馈线稳态电压分布的影响，得出了相应的结论，提出了部分建议。

主要结论如下。

1) 低压配电网中任何一点接入分布式电源，都有助于减少分布式接入线路的电压损失，对线路和台区电压有支撑作用，当馈线中接入用电负荷较小时，节点电压主要由光伏接入点到变台区母线的电气距离决定，与光伏接入点之后的馈线电气距离相关性不大。

2) 供电半径越大，分布式光伏准入容量越小。电压等级为 10 kV ，线路长度为 20 km 的LGJ-240架空线路，集中单点接入容量极限为 $1.9\sim 2.1 \text{ MW}$ 。电压等级为 10 kV ，线路长度为 10 km 的LGJ-240架空线路，集中单点接入容量极限为 2.8 MW 。

3) 在不改变其他运行条件时，同等容量分布式光伏分散接入引起的馈线电压抬升要低于集中接入馈线末端时的电压抬升，要高于集中接入馈线首端时的电压抬升。分散接入和负荷变化能改变电压变化的单调性。

4) 光伏发电容量较大时，将引起线路局部电压超出电压偏差较为严重。单点集中接入引起电能质量问题比分散接入要严重。

对接入分布式电源低压配电网运行提出部分建议。

1) 建议动态监测分布式光伏并网点和接入点，以及台区母线电压。如果负荷较轻，引起电压偏差太大，建议距离台区由远及近逐步限制分布式光伏上网负荷。

2) 建议根据负荷情况，调度部门建立分布式电源无功功率调节措施。在电压过低或者电压过高情况下，分布式电源能够发出或者吸收一部分无功功率，达到动态调节主动配电电压的目的。

3) 建议低压配电网台区母线装设电压调节和无功补偿装置，并且保留电压裕度，同时可以和分布式电源装置联合控制台区的无功功率和电压，缓解大量光伏分布式接入主动配电网带来的电压波动。

参考文献

[1] 陈炜，艾欣，吴涛，等. 光伏并网发电系统对电

- 网的影响研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (2): 26-32.
- [2] 王峰, 王春宁. 分布式电源接入系统方案典型设计研究及应用 [J]. 电气应用, 2015, 34 (21): 116-119.
- [3] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (10): 87-92.
- [4] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网的能量渗透率研究 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (8): 95-100.
- [5] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (22): 12-17.
- [6] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展 [J]. 电力系统自动化, 2012, 32 (18): 10-16.
- [7] 安树怀, 王明渝, 邓威, 等. 可用于光伏并网的双频逆变器控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (1): 84-88.
- [8] 李勋, 龚庆武, 胡元潮, 等. 智能配电网体系探讨 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (8): 108-111.
- [9] Conti S, Raiti S, Tina G, et al. Study of the impact of PV generation on voltage profile in LV distribution networks [C]. 2001 IEEE Porto Power Technology Conference, Porto, Portugal: IEEE, 2001.
- [10] 康海云, 杭乃善, 卢桥, 等. 分布式光伏发电在智能电网中的作用分析 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (10): 86-90.
- [11] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述 [J]. 电网技术, 2009, 33 (19): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 韩菲, 李强, 李道宽, 等. 考虑潮流分布的分布式电源最佳接入容量计算 [J]. 电气应用, 2014, 33 (21): 34-37.
- [14] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (1): 1-14.
- [15] 曾令诚, 吕林, 曾澜钰. 基于sollin 算法的含分布式电源的孤岛划分方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (4): 95-100.
- (收稿日期: 2017-08-30) **EA**

(上接第27页)

而基于短路电流分析可将宁德—福州电网完全解环运行, 有效降低其短路电流水平。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 任大伟, 易俊, 韩彬, 等. 浙北—福州特高压交流输电工程系统调试中电网运行方式的调整 [J]. 电网技术, 2014, 38 (12): 3354-3359.
- [3] 汤奕, 陈斌, 皮景创, 等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (7): 1790-1800.
- [4] 刘明松, 张健, 张文朝, 等. 弱电磁环网运行控制若干问题及对策 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (4): 109-114.
- [5] 田蓓, 赵二岗, 顾雨嘉, 等. 电磁环网解环暂态稳定和电压稳定量化评估 [J]. 电气应用, 2015, 34 (增刊2): 492-498.
- (收稿日期: 2016-12-22) **EA**