

# 计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计分析

徐 忻

云南电网公司 云南 昆明 650000

**摘要:** 电力系统网络迅速发展,出现多种类型的新型输电方式,电力系统形式越来越多样化,同时我国不断提出相应的环保要求,改变节能减排政策和运行方式,推动电力系统逐渐实现自动化和智能化。因此,电力系统运行对调度系统运行速度、安全性和准确性提出全新要求,通过调度系统分析,针对各项问题制定有效措施,为下一步调度提供参考。为了进一步保证电力系统安全经济运行,配电网运行状态估计分析是非常重要的。基于此,本文主要分析及高比例分布式能源接入的配电网状态估计,旨在提高配电网运行的安全性和经济性。

**关键词:** 分布式光伏能源;配电网;状态估计

分布式光伏能源在配电网中被广泛应用,具有节能环保、资源丰富、建设简单等多种显著优势特点,为了有效保证分布式能源配电网安全稳定运行,需要人们积极创建符合其运行状态估计的方法,进一步提高配电网状态估计结果的可靠性和精准性,进而全面体现出分布式光伏能源接入的配电网状态估计研究具有十分重要的现实意义。

## 1 研究意义

社会持续发展离不开电能的支持和保障,电能是最经济、便捷的能源之一,但是人们在以往发展中过度依赖石油和煤炭等传统化石能源,造成能源日益紧缺,能源危机迫在眉睫。另外,传统能源结构造成越来越严重的环境污染问题,从而人们更多注重节能减排,大力发展以风和光为主的分布式电源。分布式电源具有环保、经济、安全可靠等优势,为国家能源紧缺和环境污染问题提供有效的解决方案。我国光伏和风力发电等分布式电源大量接入配电网,配电网运行调度对于状态估计的准确性和可靠性具有更高要求<sup>[1]</sup>。状态估计主要由于引入多种类型的分布式电源,从而带来如何获得这些未配置实时量测装置的分布式电源的测量信息问题。因此,针对该问题的有效解决方案,人们需要结合多种类型的分布式电源进行合理建模和全面分析,预测分布式电源出力,将预测值当作伪量测值加入到状态估计中。相关研究人员针对不同类型分布式电源的特点,提出其在配电网内的有效模型,具有良好的实用性,同时详细研究分布式电源内的PV系统接入配电网,提出该系统显式函数拟合模型,并进行状态估计,获得良好的滤波效果。

## 2 分布式电源发展现状

分布式电源主要是建立在先进材料和制造工艺、自动控制系统等新技术上的新型电能生产系统,呈现出灵

活便捷、安全可靠、高效经济、绿色环保等优势,种类繁多。人们结合应用能源的不同,将分布式电源划分为风力和光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机发电等。新时期,我国环境污染和能源紧缺问题越来越严重,更加注重新能源开发和利用,满足社会可持续发展要求,大大推动了以风力和光伏发电为主导的分布式电源快速发展。我国政府相继出台各项法律法规,有效鼓励新能源开发利用。制定新能源发展目标,预计在2050年,我国电力生产中新能源占据比重得到较大提升,可能达到50%。分布式电源接入配电网为整个电力系统提供强有力的电压支撑,有效降低网络损耗,提高系统供电的安全稳定性,保证供电质量,提升供电服务水平<sup>[2]</sup>。但是在出力的间歇性、波动性在一定程度上为配电网的安全稳定运行带来冲击。因此,通常在潮流计算过程中,结合DG运行特性,将其详细划分成PQ、PV、PI等多种类型的节点处理。

## 3 分布式光伏能源接入的配电网状态估计研究

### 3.1 状态估计模型建立

配电网接入计及高比例分布式光伏能源之后,量测方程相应节点会注入有功功率和无功功率。配电网内分布式光伏电源发出无功功率为0,综合分析到PV系统的无功约束条件,合理创建分布式光伏能源接入配电网之后状态估计的目标函数,表示为: 
$$\begin{cases} \min J(x) = z - h(x)^T R^{-1} \\ s \cdot t \cdot c(x) = Q_{pv} x = 0 \end{cases}$$
  $[z - h(x)]$ 。公式中,  $J(x)$  代表目标函数;  $Q_{pv}(x)$  代表无功功率;单位为  $(kV \cdot A)$ ;  $x$  代表状态向量;  $z$  代表量测向量;  $R^{-1}$  代表量测向量的权重;  $h(x)$  代表量测函数。针对该公式内的等式约束条件,  $s.t.c(x) = Q_{pv}(x) = 0$ ,可以合理进行加权最小二乘法的基本步骤获得通过第(1)次迭代之后的状态估计结果  $x^{(1+1)}$ ,同时

对状态估计结果进行修正,公式为:  $\Delta x^{(1)} = \sum((x(1)) C^T[C\Sigma(x(1))CT]^{-1}\Delta c(x(1+1)))$

$$x^{(1+1)} = x^{(1)} - \Delta x^{(1)}$$

将经过多次迭代之后的状态估计结果进行修正之后,获得结果符合分布式光伏发电系统输出无功功率不大于预设的非零阈值要求,进一步保证状态估计获得结果的精准性,更加符合系统运行调度的实际需求<sup>[3]</sup>。

### 3.2 加权最小二乘法

当已知量测配置、支路参数和网络结线的情况下,测量向量 $z$ 表达形式为 $z = h(x) + v$ ,从而通过该公式获得量测向量 $z$ 之后,配电网接入分布式光伏能源的状态估计最优值为目标函数 $J(x)$ 获得最小值的 $x$ 值。 $J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]$ 。为了求取状态估计的最优值,需要针对非线性函数 $h(x)$ 线性化,在实际操作中主要假设一个最优值 $x_0$ ,通过泰勒展开式针对非线性函数在其附近做泰勒展开,忽视二次以上的非线性项之后,非线性函数的表达形式为 $h(x) \approx h(x_0) + H(x_0) \Delta x$ 。公式中 $\Delta x$ 为 $x - x_0$ ,代表 $x$ 的修整量; $H(x_0)$ 主要是通过 $m$ 个量测函数针对 $n$ 个状态变量进行求偏导之后获得的 $m \times n$ 阶雅可比矩阵。通过持续不断循环迭代直到符合预设的收敛判据,目标函数更加接近最小值,满足最终的需求,并且最后一次迭代获得的状态估计的最优值就是状态变量 $x$ 的最优解。

创建具有等式约束条件的分布式光伏能源接入配电网的状态估计模型之后,结合加权最小二乘法的配电网状态估计的具体流程为:首先,将量测量 $z$ 输入到状态估计模型内,生成量测权重矩阵 $R^{-1}$ ,同时为状态变量 $x$ 赋初值 $x$ ,结合网络参数获得节点导纳矩阵。预设最大允许误差,并将其输入到状态估计模型内,同时设定允许迭代次数的最大值,将迭代次数设定为1。然后,计算状态变量的修正量和修正值,获得分布式光伏发电系统发出的无功功率,当该无功功率的最大值不小于最大允许误差,求取状态变量的新修正量 $\Delta x'$ 和修正值 $x'$ 。最后,进行收敛判定,当 $|\Delta x_i^{(1+1)}|$ 不小于最大允许误差,代表配电网状态估计的结果满足相关需要,从而退出迭代并输出状态估计值 $x'$ 与迭代次数 $l$ 。当迭代次数小于最大迭代次数的情况下,让迭代次数 $l = l + 1$ ,转公式量测量 $z = h(x) + v$ 进行下一次迭代计算;当迭代次数等于最大迭代次数的情况下,代表最大迭代次数依然不符合收敛条件,需要输出最大迭代次数暂停计算。

### 3.3 算例分析

算例应用的分布式光伏能源接入配电网的电压等级为12.66千伏,包括33个节点和32条支路,应用标么值详

细计算,同时保证选择的电压基值和配电网络的电压等级一致,功率基值设定为10毫瓦。设置最大允许误差为 $10^{-6}$ ,借助网络软件进行仿真,同时为了有效验证在计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计的效果,通过多种工况进行详细分析,具体如下:

第一,将额定功率为20千瓦的光伏发电系统分别接入到5,20,31的节点,借助加权最小二乘法,针对分布式光伏能源接入配电网状态进行合理估计。例如,在配电网状态估计的过程中,选择节点1-16状态估计结果进行详细探究,全面对比分析光伏能源接入到节点电压之前和之后的标么值、相角的详细数值,了解其实际变化趋势,明显发现光伏能源接入节点电压之前和之后的标么值曲线基本呈现出重合状态,大部分节点电压标么值仅仅具有略微的变化,同时电压相角和平衡节点的差值都呈现出缩小的现象,尤其是编号为14,15,16节点电压相角的绝对值具有较大的减幅,充分说明了光伏能源接入配电网之后,对于多个节点电压相角具有良好的改善效果<sup>[4]</sup>。

第二,详细研究光伏能源系统在额定出力较高的情况下,系统状态量的实际变化,依然以编号为5,21,32的节点为例,将额定功率为300千瓦光伏能源系统接入到这些节点,同时进行配电网状态估计,获得的光伏能源接入之前和之后的部分节点电压标么值、电压相角的变化趋势和详细数值。

针对节点电压标么值进行分析,和光伏能源接入之前、光伏能源额定出力为20千瓦时进行对比分析,具有相对可观的变化。光伏能源接入电压节点附近的电压标么值具有一定程度上的提升,而部分节点的电压标么值具有一定程度上的下降,充分体现这个配电网系统的电压标么值波动相对较小。针对节点电压相角进行详细分析,和光伏能源接入之前具有更加显著的变化,光伏能源接入节点之后,附近的电压相角具有显著的提高,而部分节点的电压相角呈现出相对显著的下降,同时和光伏能源额定处理为20千瓦进行对比分析,整个系统的电压相角波动变化更加剧烈。

第三,为了有效验证光伏能源额定处理保持固定的基础上,而光伏能源接入节点不同时的实际滤波效果,将光伏能源系统的额定出力设定为20千瓦,接入到3,14,18节点,针对光伏能源接入配电网状态估计进行计算,获得光伏能源接入前后配电系统内部分节点电压标么值、电压相角的详细数值和具体变化趋势。明显发现光伏能源接入节点之前和之后的电压标么值具有略微变化,而电压相角和光伏能源接入之前进行对比,具有显著的改变,各个节点的电压相角、平衡节点之间的差值

都具有较少的变化,从而获得更加显著的系统电压相角改善效果。

第四,针对光伏能源额定出力一致时接入系统节点号相对集中的情况进行全面验证,设定光伏能源额定出力为20千瓦,接入到编号为10,13,17节点,通过状态估计获得部分节点电压标么值、压电相角的变化趋势和具体数值,明显发现光伏能源接入前后的节点电压幅值依然未发生显著变化,和节点3,14,18接入光伏能源相比,整体变化趋势和各项数值基本相同。而7-19节点的电压相角和光伏能源接入之前相比具有显著的提高,其他节点电压相角的变化相对较少,同时对于整个系统电压相角的改善成效和接入5,21,32节点相比较强,和3,14,18节点接入光伏能源的改善效果相比较弱。

结合集中算例进行详细分析,将计及高比例分布式光伏能源接入配电桩状态估计方法在实际应用过程中,能够更加符合含光伏能源接入的配电网状态估计的实际要求,从而创建的光伏能源模型内的光伏能源只发出有功功率,光伏能源对整个配电网系统电压的相角具有较大影响,对电压的幅值未产生较大影响,获得的配电网状态估计结果主要包含以下两部分。保持光伏能源接入节点号固定不变的基础上,当光伏能源额定出力较小时,针对系统各个节点的电压标么值、电压相角基本不会代理较大影响,但是当光伏能源额定出力越来越高的情况下,会造成系统电压幅度、相角波动程度呈现出持续增大的趋势,整体上额定出力不同的光伏能源对系统电压相角具有一定程度的改善效果,但是在一定条件下同样会造成部分节点电压相角和平衡节点之间的偏差逐渐增大。另外,在光伏能源额定出力保持固定不变,但是接入节点号不同的基础上,当光伏能源所接入节点相对集中的情况下,光伏能源所接入的节点附近电压相角呈现出相对显著的变化,同时电压相角和平衡节点的偏差逐渐变小,具有明显的改善效果,并且对其他节点具有轻微影响。当光伏能源接入节点相对分散的情况下,对于系统电压相角带来的影响和接入节点集中的条件基本一致,但是系统电压相角具有显著变化的区域具有一定程度的扩大。因此,针对光伏能源接入配电网状态估计分析,选择最佳的光伏能源接入位置,对电压相角起到良好的改善作用<sup>[5]</sup>。另外,针对分布式光伏能源接入配电网可以选择新型滤波和补偿装置,以坡莫合金材料制造

的高密度电抗器,在不需要电容的条件下,能够提高滤波效率,为配电网系统提供近似于正弦波的工作环境(如图1所示)。通过滤波之后,有效改善了电网电流波形。

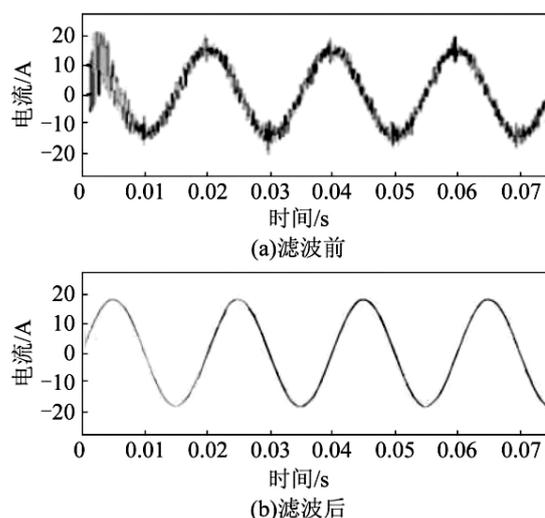


图1: 滤波前后注入电网电流的波形

结语: 针对接入计及高比例分布式光伏能源的配电网进行研究和分析和过程中,借助加权最小二乘法理论的状态估计方法,将光伏能源发电系统当作未配备量测装置的PQ节点,采用预测方法获得信息数据,并将其当作光伏能源有功功率的伪测量。在加权最小二乘法的基础上进行相应改进,增加计及高比例分布式光伏能源接入后的等约束条件,并进行仿真验证,验证了状态估计方法针对计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计具有较高的可行性和实效性。

#### 参考文献

- [1]刘文亮. 基于大数据的高比例新能源接入配电网状态估计方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(012):000-001.
- [2]王义, 杨志伟, 吴坡, 等. 计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10):12-18.
- [3]曹炜, 董浩洋, 李芸, 等. 分布式光伏高比例接入的国外经验及实践启示[J]. 电气传动, 2022, 52(4):9-9.
- [4]李莉杰, 宋百川, 孙丹丹, 等. 基于大数据的分布式光伏接入配电网影响分析与功率预测研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(2):9-9.
- [5]柯赛, 黄佳欣. 分布式光伏电站接入配电网引发问题分析及对策研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2021(7): 2-2.