

分布式光伏并网对配电网的影响研究

张艳萍^{1,2}, 郭成¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 昌平 102206)

摘要: 针对大规模分布式光伏并网给配电网带来的问题, 该论文从潮流、电能质量(电压偏差、电压波动与闪变、谐波与谐振问题、三相不平衡问题)、网络损耗和配电网保护等方面综述了分布式光伏接入配电网的影响、产生这些影响的原因、以及对相应不利影响的解决措施。所做的工作有助于指导相关研究和实际应用, 达到提高配电网对光伏发电的消纳能力、降低分布式光伏并网对配电网的不利影响的目的。

关键词: 分布式光伏; 潮流; 电能质量; 网络损耗; 配电网保护

Review on the Influence of Distributed Photovoltaic Grid Connection on Distribution Network

Zhang Yanping^{1,2}, Guo Cheng²

(1. Electric Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District 102206,
Beijing, China)

Abstract: In view of the problems brought by large-scale distributed photovoltaic grid connection to the distribution network, this paper summarizes the effects of distributed photovoltaic grid-connected on distribution network, the causes of these effects, and the solutions to the corresponding adverse effects from the aspects of power flow, power quality (voltage deviation, voltage fluctuation and flicker, harmonic and resonance problem, three-phase imbalance problem), network loss and distribution network protection. The work is helpful to guide the relevant research and practical application, to improve the absorption capacity of distribution networks for photovoltaic power generation and reduce the adverse impact of distributed photovoltaic grid connection on the distribution network.

Key words: Distributed photovoltaic; Power flow; Power quality; Network loss; Distribution network protection

中图分类号: TM74 文献标识码: B 文章编号: 1006-7345 (2021) 01-0038-06

0 前言

太阳能具有无污染、可再生等特点, 光伏发电发展迅速。在政策的驱动下, 我国光伏发电从2013年开始呈现爆发式增长, 到2019年累计装机容量实现了超10倍增长。从2013年至2020年, 我国每年的新增光伏装机容量情况如图1所示。随着近年来国家政策往分布式光伏发电的倾斜, 我国光伏发电市场结构发生明显变化, 分布式光伏发电累计装机容量份额持续提升, 到2019年其市场占比已提升至30.7%。分布式光伏发电前景光明, 具有以下特点:

1) 发电系统一般装设于用户侧附近, 分散布局、就近消纳、自发自用、多余电量上网;

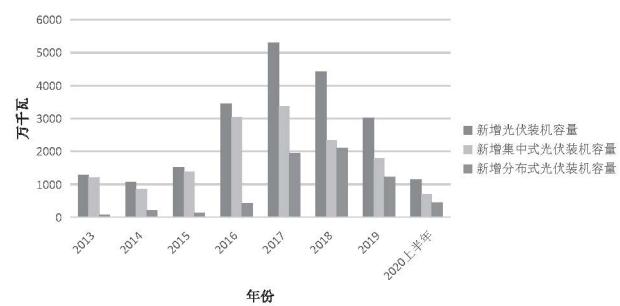


图1 我国光伏发电并网装机容量变化情况

2) 单个项目的装机容量较小, 分布式光伏一般局部高密度接入低压配电网;

3) 受光照辐射强度、环境温湿度等因素影响, 光伏发电出力具有不确定性^[1]。

然而, 光伏发电的随机波动性、逆变技术

含大量电力电子器件等特点会使得大规模分布式光伏并网后对电网的安全运行、可靠调度、经济效益等造成一定影响。这种影响呈现“局部向全局发展、配电网向主网延伸”的趋势，将对无功优化、电能质量控制、系统稳定性控制、电网调度等有着更高要求^[2]。因此，研究分布式光伏并网对配电网的影响至关重要，有助于我们充分开发利用太阳能。

目前，对分布式光伏发电接入配电网造成的影响有着许多研究。论文主要对相关研究进行了总结，从潮流、电能质量、网络损耗和配电网保护等方面综述了分布式光伏并网产生的问题、产生各类问题的原因以及解决方案，为光伏发电的应用推广提供方便。

1 分布式光伏并网对配电网潮流的影响

1.1 潮流分布

分布式光伏的大量接入使配电网逐步由“无源网”发展为“有源网”，潮流分布发生改变，电网下网潮流变轻，可能导致潮流倒送。分布式光伏电源的接入位置、接入容量、输出功率波动情况以及网络结构等因素都会使潮流的大小和方向产生变化^[3-4]。

文献[5]以某电厂分布式光伏为研究案例，分析了分布式光伏并网对系统潮流变化、电能质量、继保自动化等方面产生的影响，并提出了一些解决汕头电网电压越限、潮流突变、继保方式配合等问题的相关策略和建议。文献[6]结合实际屋顶分布式光伏发电项目阐述了单个光伏接入后对配电网潮流分布的影响，当光伏出力小于接入点所带负荷时，潮流流向不变，并网点前的路线下网潮流有所降低；当光伏出力大于接入点所带负荷时，若并网点位于线路首端，潮流方向不变，但位于中端或末端则会出现双向潮流，潮流大小可能比无光伏接入时还大；当光伏出力大于馈线总负荷时，潮流将从光伏并网点流向母线和其他节点的负荷，潮流反向。

在实际应用中，分布式光伏需控制并网容量，不允许潮流倒送，尽量接入负荷较大的点，做到就地消纳，或采用专线接入馈线首端。

1.2 潮流计算

分布式光伏并网使得配电网电源结构改变，传统配网潮流计算方法便不再适用于主动配电

网。含分布式光伏的配电网潮流计算需考虑光伏并网方式和控制策略，其潮流计算模型要相对应地重新建立；节点类型更多，要分别处理不同节点类型的分布式光伏。

文献[7]提出了可应用于含分布式电源配电网的改进回路分析法，利用配电网的特点将电压回路方程简化为线性代数方程，得到了 PV 型分布式电源的发电无功功率和节点电压分布，仿真算例表明该方法比牛顿法计算时间短，计算精度高。文献[8]利用梯度下降法优化了牛顿法中的雅克比矩阵，结论表明改进算法在收敛性、计算时间等方面比传统方法均有所提高。文献[9]给出了各类型分布式电源的控制方程，提出“将电流控制型逆变电源的控制方程和三相出力修正量纳入偏差修正向量”的方法改进牛顿-拉夫逊法。

前推回代法因其更适应配电网辐射型结构、高阻抗比的特点而广泛应用于配网潮流计算，对其的改进方法也众多。文献[10]引入节点电抗矩阵对传统的前推回代法进行了改进，并应用无功分摊原理确定分布式电源的无功初值，得到了各节点类型的分布式电源单独接入配电网以及混合接入情况下的潮流计算结果和基于分摊原理确定无功初值、初值为 0 以及初值为无功上下限之和的一半这三种方法的仿真对比结果。文献[11]考虑了多种负荷模型改进前推回代法，改进后的方法通过搜索叶节点确定前推和回代的计算顺序，无需考虑节点编号，不用形成节点导纳矩阵和节点-支路关联矩阵，使计算过程较为简洁。文献[12]改进了前推回代法，对 PV 型分布式电源引入节点无功功率调节量 ΔQ 的方程，仅用支路上游节点信息，直接计算 PV 节点电压相角和无功功率，并引入调节系数保证算法收敛。随着分布式电源并网数量和种类的增加，现有的配电网潮流算法仍有待考验，需不断进行优化。

2 分布式光伏并网对电能质量的影响

大规模分布式光伏并网对配电网电能质量的影响主要体现在电压偏差、电压波动与闪变、谐波与谐振问题以及三相不平衡问题等方面上^[13]。

2.1 电压偏差

传统配电网是单一的辐射型网络，节点电

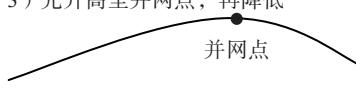
压沿潮流方向逐渐降低。分布式光伏并网改变了配电网潮流方向和大小，分布式光伏注入有功功率使得线路上传输的功率减少，导致各节点电压抬升，对各负荷点的电压偏差产生影响。如果并网容量过大、光伏出力过多，极有可能产生电压越限的问题，造成过电压。因此，研究分布式光伏并网对配电网电压的影响是一个很热门的话题。

文献[14-15]从光伏发电出力、接入位置、线路参数和负荷不同等方面分析了单个和多个分布式光伏并网对配电网电压的影响，提出了通过感性无功功率补偿、逆变器电压控制补偿或加装蓄电池储能装置来解决配电网中高渗透率分布式光伏造成的电压越限问题。文献[16]通过理论分析提出一种分布式光伏接入位置变化时的最大接入容量计算方法，并结合BPA工具从单点、多点接入进行仿真分析，最后提出“电抗器补偿、逆变器控制”两种有效改善系统节点电压的方法。单个分布式光伏接入配电网时各种因素对配电网电压变化的具体影响如表1所示。多个分布式光伏并网时，若某节点及该节点后面所有节点所带负荷的总有功功率大于所有光伏总出力，则该节点电压要小于前一个节点的电压；反之则要高于前一个节点的电压。还有相较于分布式光伏集中接入线路末端某一点，平均分散接入时对配网电压的抬升幅度要小。文献[17]针对配电网正常运行、扰动运行和故障运行三种状态，分别提出对应的电压期望值设定方法和电压控制策略，实现分布式光伏就地自适应的电压控制。由于光伏出力的随机性和同一地区分布式光伏之间的相关性都会对该地区配电网的电压产生影响，文献[18]利用Nataf变换与正态变换解决了光伏相关性问题，利用概率潮流法得到配电网节点电压作为约束条件建立分布式光伏发电准入容量模型。文献[19]在对光照辐射强度、负荷情况进行短期预测的基础上，以防止过电压、最小化光伏出力的削减量为前提确定了各分布式光伏电源的调度结果，并应用模糊神经网络算法自适应地调整各光伏电源发电的削减量，使之能公平地承担电压管理之责。

目前，分布式光伏参与配电网电压调控主要分为有功调压和无功调压。有功调压主要通

过光伏并网削减、储能有功调节^[20]等方法高效实现功率本地消纳，但有功削减会降低设备利用率，影响电网发电收益和经济效益，储能技术又还未成熟；无功调压可通过各类换流器的相角旋转实现无功补充，灵活性较高且不依赖于储能配置，但大量的无功流入会造成配电网系统功率因数劣化、网损增加^[21]。因此，对分布式光伏如何更好地参与配电网电压控制还需进一步研究。

表1 单个分布式光伏并网时各因素对电压的影响

影响因素	变化趋势
光伏出力	光伏出力越大，对线路电压的抬升幅度越明显。随着光伏出力的增加，线路各节点电压的变化趋势（从首端至尾端）有以下三种：
	1) 逐步降低
	
	2) 先降低，再升高至并网点，再降低
	
	3) 先升高至并网点，再降低
	
并网点位置	并网点越接近线路末端，对线路电压的抬升作用越大。
线路参数	线路长度越长，导线横截面积越小，线路电压上升越多。
负荷	线路所带负荷越小，线路电压升高越多。

2.2 电压波动与闪变

虽然分布式光伏并网增加了系统短路容量，有利于系统电压强度的加强，对配电网的电压波动有一定抑制作用，但由于太阳能受自然因素影响，使得分布式光伏周期性地投切，出力随机波动，这可能造成系统电压波动与电压闪变。

文献[22]理论分析并仿真验证了单个分布式光伏并网前后和光伏出力不同时的电压波动情况，分布式光伏的投切和运行过程中输出功率的变化都会使馈线上各节点电压产生波动，波动幅度与分布式光伏接入位置、光伏出力及该点的电网强度有关。文献[23]搭建了数字闪变仪模型，利用虚拟阻抗网络测试光伏逆变器重载启动、轻载启动、不同功率稳定运行几种工况下的电压闪变情况，通过分析可知：重载启动工况下的闪变显著大于轻载启动引起的闪

变；并网光伏逆变器引起的电压闪变值与光伏逆变器并网点短路容量呈反比，与并网点阻抗角呈负相关。文献[24]理论分析并仿真验证了分布式光伏电源不同接入容量和光伏接入点不同短路容量对配电网电压波动大小的影响，还验证了环网结构可以增大并网点短路容量，分布式光伏接入环网对电压波动的影响要比接入辐射网小。

2.3 谐波与谐振问题

分布式光伏并网需要大量的电力电子器件，这些器件会经常性地不断闭合和断开，这容易在开关频率附近产生谐波。此外，分布式光伏并网常采用的最大功率点跟踪算法也会产生谐波。电网中的多个谐波源还可能产生高次谐波谐振问题。

谐波补偿技术与群控技术是治理电网谐波的两种新技术。文献[25]研究了光伏发电系统产生的电流谐波对低压配电网的影响，以及对其他非线性负荷和电网电压的相互作用，并结合实际电网进行算例分析；文献[26]在光伏并网系统的内部电路、并网控制策略这两方面提出了抑制谐波的方法。文献[27]提出了应用有源滤波器治理光伏并网谐波问题的方法，通过实验证明了该方法具有较好的效果。文献[28]对光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制进行了研究，重塑后的阻抗呈现足够大的阻性时，可有效抑制网络内的高频谐波谐振。

2.4 三相不平衡问题

含分布式光伏的配电网存在的三相不平衡问题主要是由负荷的分配不平衡与分布式光伏电源出力随机、发电不平衡这些因素造成的。如果不及时加以控制，分布式光伏的大量单相接入会大大加重配电网的三相电压不平衡问题，反之通过合理接入光伏电源也可大大降低配网的不平衡度，改善配网三相不平衡问题。

文献[29]把分布式光伏和配电网负荷三相不平衡自动调整装置结合起来，先通过数据分析光伏电源接入的相序，再利用自动换相装置把光伏电源接入到负荷较大的相上以解决配电网三相不平衡的问题。文献[30]提出了一种考虑多种无功补偿方式与分布式光伏结合的三相不平衡配电网无功优化模型，该模型的目标是降低网损和负序电压分量使之最小，并通过分

支定界法求得最优解。文献[31]通过建立考虑潮流约束、电压偏差和三相不平衡度的分布式光伏最大准入容量模型进行配电网分布式光伏多目标优化配置研究。文献[32]先以三相有功不平衡度为指标确定换相开关的控制策略，对负荷进行重新分配，再发挥分布式光伏逆变器的无功调节能力，以线损最小为目标建立无功优化模型，在降低三相不平衡度的基础上进一步改善电压质量，减小损耗。

3 分布式光伏并网对网络损耗的影响

当分布式光伏所发电能基本能就地消纳时，需要从上级电网获得的电能就少，故电能损失就较少，配电网整体线损会降低。但分布式光伏容量超过配电网负荷后，所发电能无法完全本地消纳，便会向上级电网反送，使对配电网线损的降低幅度减小，当容量足够大时反而会使低压配电网的线损升高，因此分布式光伏电源并网容量选择需以配电网实际需求负荷为依据，以接近实际需求负荷为宜。

文献[33]研究了配网参数（阻抗比、所带负荷量、负荷功率因数）不同时，分布式光伏出力和功率因数对网损的影响，得出以下结论：

- 1) 光伏有功出力恒定且小于或等于配网总负荷有功的60%时，配电网的阻抗比越大网损越小，负荷量越大网损越小；
- 2) 而光伏有功出力为配电网总负荷有功80%的情况下，分布式光伏以滞后功率因数运行时网损随着配网阻抗比的增大先增后减，以超前功率因数运行时网损随着配网R/X的增大而增加，分布式光伏无论以超前还是滞后功率因数运行网损随着配电网负荷水平的增加而增加；

3) 分布式光伏无论以超前还是滞后功率因数运行，随着有功出力的逐步增加，网损呈向上开口的抛物线变化，总存在一个使配电网网损最小的光伏出力水平。文献[34-35]对比分析了光伏并网前后配电网的网损情况，对不同接入容量、接入位置、接入方式和接入数量各情况下配电网网损的变化情况做了分析研究。

4 分布式光伏并网对配电网保护的影响

传统配网是单电源接入网络，其保护系统

也是在此基础上设计的，而分布式光伏并网改变了传统配网的潮流分布规律和网供负荷的性质，故障特性亦随之发生改变，继电保护整定计算和控制更为繁复，对保护配置的要求更高。分布式光伏并网引起的配电网保护问题及原因见表2。

表2 分布式光伏并网引起的配电网保护问题及原因^[36-38]

产生的问题	原因
导致故障所在线路的三段式电流保护动作灵敏度降低甚至拒动，故障邻近线路的保护误动作。	分布式光伏并网会影响故障电流的大小、方向和持续时间。
减小了距离保护的保护范围，可能因邻近故障区域的故障触发本区域保护误动作。	分布式光伏接入配网可能会使阻抗继电器测量到的阻抗大于实际的故障阻，导致阻抗继电器对应的故障距离增加。
自动重合闸失败。	在故障发生后，分布式光伏电源仍给故障点持续供电，使电弧无法熄灭；孤岛运行频率与电网频率出现偏差导致非同步合闸。
产生孤岛运行，威胁电网和人身安全。	分布式光伏电源能提供电能给从配电网隔离的部分负荷，形成孤岛。

现有许多学者对分布式光伏并网对配电网保护产生的影响进行了研究。文献[37]研究了光伏并网对电网保护和重合闸的影响，提出了两种含光伏发电并网的馈线保护新方案，但都存在缺陷难以广泛应用于实际，需要进行完善。文献[39]仿真分析了在配电网发生三相短路、两相短路、逆变器内晶体管器件开路、单相断路时光伏并网逆变器输出电流的变化特性，并根据相关结论对逆变器自身故障的保护提出了要求。文献[40]仿真分析了不同位置故障时光伏并网对Ⅱ段距离保护灵敏度造成的影响，并设计根据光伏出力变化实现保护自适应整定。文献[41]提出了一种通过“比较发生故障前的各母线电压相位与发生故障后正序电流故障分量的相位”确定保护策略的保护方法。

分布式光伏并网对纵联保护没有影响，但潮流方向的改变可能会使得电流保护和距离保护误动作和拒动作，进一步扩大故障范围。配网发生故障时，分布式光伏的低电压穿越运行状态会继续供电，影响线路重合闸和备自投。对于含高比例分布式光伏的配电网，传统单端保护无法满足运行要求，关于配电网保护新策略（如自适应继电保护、以光纤差动为代表的快速保护）的研究还需进一步深入。

5 结束语

论文总结了分布式光伏并网对配电网潮流、电压问题、谐波与谐振问题、三相不平衡问题、网络损耗和配电保护等方面的影响、产生这些影响的原因、以及对相应不利影响的解决措施。目前对这些问题的研究已有许多，然而还存在许多不足，需要进一步深入：

- 1) 关于分布式光伏不同接入位置和装机容量对潮流分布影响的研究较多，光伏出力波动对潮流分布的动态影响的研究较少。
- 2) 目前的研究主要以电压越限为控制目标来决定分布式光伏接入容量和接入位置，未建立运行电压预警机制，未充分考虑低压配电网中线径较小、配变容量较小的实际特点。
- 3) 当前研究多关注光伏逆变器、分布式储能和OLTC等设备在含分布式光伏的配电网中的控制，对于诸如虚拟同步机和固态分接头变压器等新型设备应用的研究还不足。
- 4) 现有的文献中研究分布式光伏并网对配电网影响的较多，分布式光伏与配电网协调控制的研究仍需进一步进行，受限于低压配电网有载调压设备和智能无功补偿设备未普及、储能技术不成熟、设备昂贵寿命短等实际因素许多控制方法还无法广泛应用。
- 5) 目前对分布式光伏参与配电网电压调控的研究可主要分为有功调压和无功调压，但有功调压会降低设备利用率，影响电网发电收益和经济效益，无功调压可能会造成配电网系统功率因数劣化、网损增加。因此，对分布式光伏如何更好地参与配电网电压控制还需进一步研究。
- 6) 国内对利用分布式光伏解决配电网三相不平衡问题的研究主要是将不平衡问题作为约束条件建立目标函数确定分布式光伏并网容量，未能充分发挥分布式光伏在解决配网三相不平衡问题上的优势，其研究还不够，未及国外先进水平。
- 7) 对于含高比例分布式光伏的配电网，传统单端保护无法满足运行要求，关于配电网保护新策略（如自适应继电保护、以光纤差动为代表的快速保护）的研究还需进一步深入。

参考文献

- [1] 郑超,林俊杰,赵健,等.规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J].中国电机工程学报,2015,(5): 1059-1071.

- [2] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议 [J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
- [3] 郭剑, 徐剑楠. 分布式光伏并网发电对配电网的影响以及应对调整策略 [J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(2): 38-44.
- [4] 王震, 鲁宗相, 段晓波, 等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 18-24.
- [5] 林达瀚. 汕头地区分布式光伏接入规划及其并网对系统的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [6] 任泳橙. 分布式光伏并网对配电网潮流和网损的影响及对策 [J]. 供用电, 2017, (2): 64-68.
- [7] 牛焕娜, 井天军, 李汉成, 等. 基于回路分析的含分布式电源配电网简化潮流计算 [J]. 电网技术, 2013, (4): 1033-1038.
- [8] 闫丽梅, 谢明霞, 徐建军, 等. 含分布式电源的配电网潮流改进算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, (5): 17-22.
- [9] 杨晓萍, 宋智翔, 胡杨, 等. 考虑分布式电源控制方程的中低压配电网三相潮流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, (3): 9-15+22.
- [10] 梁宵, 焦彦军, 蒋晨阳. 计及分布式电源的改进配网潮流计算方法 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, (4): 59-65.
- [11] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.
- [12] 董张卓, 张倍倍, 刘魁, 等. 有源配电网新前推回代潮流计算方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, (12): 101-107.
- [13] 思勤, 汪鹏, 赛颖夫. 分布式电源接入中低压配电网安全性评估方法 [J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(04): 5-9+23.
- [14] 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, (10): 140-146.
- [15] 李亚玲, 韦磊, 赵景涛, 等. 分布式光伏并网对配电网电压的影响 [J]. 电源技术, 2016, 40(6): 1257-1259+1306.
- [16] 郭鹏超, 杨秀, 张美霞, 等. 分布式光伏接入配电网对电压分布的影响 [J]. 电源技术, 2016, 40(8): 660-1664.
- [17] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
- [18] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究 [J]. 电工技术学报, 2018, (7): 1560-1569.
- [19] 杨金东, 刘红文. 含高渗透率光伏发电配电网兼顾经济性和公平的电压管理 [J]. 云南电力技术, 2020, 48(03): 77-83.
- [20] 张静炜, 朱想, 赫卫国, 等. 考虑光伏发电和储能系统调压能力的配电网储能容量优化配置 [J]. 广东电力, 2018, 31(07): 30-35.
- [21] 张从越, 窦晓波, 张章, 徐科, 吴在军. 基于变流器统一结构模型的光伏高渗透配电网鲁棒自适应动态电压控制. 中国电机工程学报. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191569>
- [22] 翟文杰, 李建泉, 吴小云, 等. 分布式光伏发电对配电网供电电压的影响研究 [J]. 大功率变流技术, 2013, 4: 43-47.
- [23] 董玮, 黄晶生, 徐亮辉, 等. 并网光伏逆变器闪变特性测量与分析 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 51-55.
- [24] 陈懿, 刘涤尘, 吴军, 等. 分布式光伏电源对配电网电压波动的影响研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 27-32.
- [25] Benhabib M C, Myrzik J M A, Duarte J L. Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network [C]// International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. IEEE, 2008: 1-6.
- [26] Ito T, Miyata H, Taniguchi M, et al. Harmonic current reduction control for grid-connected PV generation systems [C]// Power Electronics Conference. IEEE, 2010: 1695-1700.
- [27] 赵小林, 吴雷, 周怡. 光伏并网配电系统谐波治理的分析与研究 [J]. 低压电器, 2011, (22): 16-18.
- [28] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (27) : 4547-4558.
- [29] 李三申. 光伏接入用于低压电网三相不平衡治理研究与设计 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [30] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 13-18.
- [31] 郑成立. 配电网中分布式光伏的优化配置研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [32] 黄辉, 余泓沂, 刘鹏伟. 考虑三相有功不平衡度的无功电压集中控制策略 [J]. 云南电力技术, 2020, 48(02): 31-36.
- [33] 寇凤海. 分布式光伏电源对配电网网损的影响 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 62-68.
- [34] 陈虎, 张田, 裴辉明, 等. 分布式光伏接入对电网电压和网损的影响分析 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(23): 63-69.
- [35] 唐越, 向小民, 危杰, 等. 分布式光伏接入电网对配电网网损的影响研究 [J]. 电力学报, 2018, 33(04): 301~306.
- [36] 张勇. 分布式发电对电网继电保护的影响综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(02): 145-151.
- [37] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策 [J]. 电力自动化设备, 2013, (4): 12-17+23.
- [38] 邓景松, 王英民, 孙迪飞, 等. 基于配电网电流保护约束的分布式光伏电源容量分析 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 629-636.
- [39] 刘健, 林涛, 同向前, 等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [40] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, (15): 75-79.
- [41] 孙玲玲, 王宁, 贾清泉, 等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法 [J]. 电力自动化设备, 2018, (6): 79-86.

收稿日期: 2020-11-28

作者简介:

张艳萍 (1996), 女, 硕士研究生, 华北电力大学, 主要从事配电网无功电压优化控制研究。 (E-mail) 2779393839@qq.com;

郭成 (1978), 男, 博士, 教授级高级工程师, 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 主要从事电能质量分析与控制, 电力系统分析研究工作。 (E-mail) gc325@126.com。

《云南电力技术》网上投稿页面: <http://yndljs.cnjournals.cn>。欢迎广大读者通过“作者登陆”投稿!