

DOI: 10.7667/PSPC170529

考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究

李振坤¹, 鲍新雨¹, 邵宇鹰², 彭鹏², 王文俊³

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122;
3. 国网浙江浦江供电公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 随着分布式光伏的大量并网, 电压越限成为限制其大量接入的重要因素。针对光伏接入引起电压越限的情况, 研究了多种调压措施对配电网光伏接纳能力的影响。首先, 从电压不越限、潮流不过载等约束条件出发, 建立了分布式光伏消纳模型。其次, 分析了加入调压措施对分布式光伏消纳能力的影响。最后, 采用试探法求解了不加调压措施前和加入调压措施后光伏的最大准入容量。以 IEEE33 节点配电系统为仿真算例, 分析了限制各个节点光伏容量增加的原因。仿真结果表明, 考虑调压措施可以有效地提高分布式光伏的消纳能力, 避免电压越限的发生。

关键词: 分布式光伏; 电压越限; 准入容量; 消纳能力; 调压措施

Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures

LI Zhenkun¹, BAO Xinyu¹, SHAO Yuying², PENG Peng², WANG Wenjun³

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. Pujiang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Jinhua 321000, China)

Abstract: With more and more photovoltaic connected to the grid, the voltage violation has become an important factor in restricting a large number of PV in distributed network. In order to solve this phenomenon, this paper studies the influence of many voltage regulation measures on distribution network PV accommodating capability. Firstly, considering constraint conditions of voltage not violation and power flow under load, it establishes a distributed PV accommodation model. Secondly, it analyzes the effect of PV accommodation after adding voltage regulation measures. Finally, it calculates the maximum grid-connected capacities before and after considering voltage regulation measures by using heuristics method. The IEEE33 bus distribution system is simulated and the restricted factors to the increase of PV capacities of each node is analyzed. The result shows that considering voltage regulation measures effectively improves the photovoltaic accommodation ability and avoids node voltage violation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407113) and Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: distributed photovoltaic; voltage violation; penetration capacity; accommodation ability; voltage regulation measures

0 引言

近几年来, 随着全球经济的快速发展, 人们对于新型能源的需求也越来越大。分布式电源(Distributed Generation, DG)以其高效、灵活、清洁

的优点而得到越来越多的关注。当前, DG 的应用多以接入配电网为主, 由于 DG 接入使配电系统从无源网络变成了具有双向潮流的有源网络, 这会对系统的潮流、电能质量、网络损耗等均造成重要的影响^[1-2]。而分布式光伏(Photovoltaic, PV)作为分布式电源中发展最快的一种, 其本身随太阳辐射强度影响较大, 具有波动性和随机性^[3-4]。随着越来越多高渗透率的分布式光伏并网, 计算其最大准入容量,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51407113); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

并对其消纳能力进行研究具有十分重要的意义。

分布式电源最大准入容量的计算常见的有试探法、解析法和数学优化法。文献[5-6]所提的试探法,即给定一个分布式电源的容量和位置,计算在各种负荷水平下系统短路电流和电压分布,如果系统短路电流和电压分布都满足安全运行的要求,再增加分布式电源的容量,重复上述计算,直到分布式电源的容量不再增加为止。文献[7]分析了解析法是为了计算分布式电源的准入容量,建立解析方程,来计算满足方程的分布式电源的准入容量。文献[8-9]的数学优化法,即以最大准入功率为目标函数,给出系统参数,考虑各种约束,用优化算法求解出状态变量、控制变量,为电压调整措施提供指导。

随着越来越多的 PV 接入配电网,国内外许多学者对此也展开了研究热潮,大多数是基于通信设备对 PV 电源和配电网进行全局协调控制^[10],以此保证节点不出现电压越限、线路潮流过载等现象,从而提高分布式光伏的渗透率,并提高光伏消纳能力。目前,主要通过两类方法:(1)通过电网改造^[11]、加入需求侧管理^[12-13]、增加储能^[14-15]等措施来提高分布式光伏的消纳能力,但是这些措施由于成本过高、运行维护复杂、没有完善的管理体制等不利因素而并未成为最佳措施;(2)从优化控制策略以及考虑主动管理措施方面出发,最大限度地提高分布式光伏的消纳能力。文献[16]考虑了电压调整约束的优化模型,该模型可以模拟有载调压变压器及多个分布式电源并网的情况;并建立了以准入功率最大化为上层优化目标,以满足电压约束为下层优化目标的计算模型;探讨了分布式电源接入位置对准入功率的影响。文献[17]在不同位置处接入光伏电源,考虑了电压偏差和谐波约束下的光伏最大渗透率,同时还分析了线路调压器与光伏接入点短路容量和光伏渗透率的关系。文献[18-19]主要通过光伏并网逆变器的 Volt/Var 控制,进行电压就地分散式调节,以此改善光伏并网特性,并以系统电压偏差及无功调节量最小为目标,通过粒子群算法整定逆变器无功电压控制参数,从而达到提升光伏消纳能力的作用。

由于电压越限是影响分布式光伏消纳能力最主要的因素^[20]。德国针对并网节点电压越限的逆变器的无功控制策略研究较多,主要是以下四种:恒功率因数 $\cos \varphi$ 控制^[21-22]、恒无功功率 Q 控制^[21]、基于光伏有功输出的 $\cos \varphi(P)$ 控制^[23]、基于并网节点电压幅值的 $Q(U)$ 控制^[21,24]。相关文献^[21,25]研究表明恒功率因数 $\cos \varphi$ 控制和恒无功功率 Q 控制不能有效地

解决电压越限的问题。

本文从电压不越限、潮流不过载等约束条件出发,建立了以分布式光伏最大接入容量为目标函数的模型,并将调压措施考虑其中,使得电压能保持在规定的约束范围内,从而可以达到增加分布式光伏接纳容量的目的。在 IEEE33 节点配电网算例中,验证了考虑调压措施可以有效地提高分布式光伏的消纳能力,同时还分析了不加调压措施前限制各个节点光伏容量继续增加的原因。

1 分布式光伏对电压分布的影响及调压措施的选择

1.1 分布式光伏接入对电压分布的影响

目前,限制 PV 接入最主要的影响因素为节点电压约束。含分布式光伏电源的配电网模型如图 1 所示,假设一条辐射式的馈线上有 N 个节点,各节点接有分布式光伏电源和负荷。图 1 中:0 号节点代表母线; (R_k, X_k) 代表第 k 段馈线的等值阻抗; $(P_{L,k}, Q_{L,k})$ 代表第 k 个节点的负荷功率; $(P_{PV,k}, Q_{PV,k})$ 代表第 k 个节点所安装的光伏功率。当 PV 接入配电网时,由于其提供有功和无功功率,可以减少馈线上的电压损失,第 k 个节点到母线处的电压损失如式 (1) 所示。

$$\Delta U_k \% = \frac{\sum_{j=1}^k [R_j \sum_{i=j}^n P_{L,i} + X_j \sum_{i=j}^n Q_{L,i}]}{U_N^2} \times 100 - \frac{\sum_{j=1}^k [R_j \sum_{i=j}^n P_{PV,i} + X_j \sum_{i=j}^n Q_{PV,i}]}{U_N^2} \times 100 \quad (1)$$

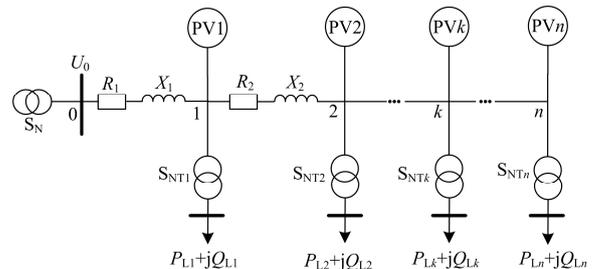


图 1 含 PV 的辐射式配电网模型

Fig. 1 Radial distribution network model with distributed photovoltaic

1.2 调压措施的选择

分布式光伏大量接入配电网,必然会抬高节点的电压,使电压越限,对配电网的正常运行造成影响,因此必须使用合理的调压措施使电压稳定在正常运行的范围内。当节点电压接近上限时,需要吸收一定的无功功率来降低节点电压;当节点电压接

近下限时, 需要补偿一定的无功功率来升高节点电压。本文考虑加入 $\cos \varphi(P)$ 和 $Q(U)$ 调压策略来解决电压越限的问题, 并研究加入这两种调压措施对光伏消纳能力的影响。 $\cos \varphi(P)$ 控制策略根据光伏出力的大小来设定功率因数, 克服了恒功率因数 $\cos \varphi$ 控制的缺点。当 PV 出力不断增加时会抬升节点的电压, 此时改变逆变器的功率因数来吸收无功, 可削减 PV 增加对电压抬升所带来的影响。 $Q(U)$ 控制策略是直接采集了并网点的电压值, 该电压值是光伏出力和负荷共同作用的结果, 可以根据电压幅值的大小来确定无功参考值。当并网点电压偏低时, 发出无功, 提高节点电压; 当并网点电压偏高时, 吸收无功, 降低节点电压。

2 分布式光伏消纳能力建模

2.1 优化目标

分布式光伏并网可以有效地缓解电力资源短缺所带来的影响, 配电网中 PV 的最大消纳能力和负荷水平、渗透率、线路网损等均有关系。PV 并网会造成电压越限、潮流过载等问题的发生, 因此必须考虑这些约束条件, 计算出 PV 最大准入容量, 并建立 PV 消纳能力求解模型。本文以一条馈线中所接入的光伏总容量最大为目标函数, 如式(2)所示。

$$f = \max P_{PV,i} \quad (2)$$

式中, $P_{PV,i}$ 为第 i 个节点接入分布式光伏的有功功率。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

在电网安全稳定运行的前提下, 含 PV 的配电网的功率平衡方程如式(3)、式(4)所示, 将其作为 PV 最大准入容量计算模型的等式约束。

$$P_{PV,i} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{PV,i} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

式中: $P_{PV,i}$ 、 $Q_{PV,i}$ 分别是节点 i 处分布式光伏的有功和无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别是节点 i 处负荷的有功和无功功率; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 间的电压相角。

2) 节点电压约束

PV 接入配电网, 必然会引起节点电压发生变化, 因此必须要求节点电压在一定约束范围内。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (5)$$

式中: $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别是通过节点 i 的电压最小值和最大值。

3) 线路潮流约束

PV 并网后, 节点电压发生变化, 会引起线路潮流的变化, 因此线路潮流必须控制在合理的范围内。

$$S_l \leq S_{l,\max} \quad (6)$$

式中, S_l 、 $S_{l,\max}$ 分别是通过线路 l 的视在功率和最大传输功率。

4) PV 出力约束

由于受到光照强度、环境温度等条件影响, PV 的最大容量不是无限增长的, 为了使 PV 的有功功率输出保持最大, 可将 PV 出力约束表示为

$$P_{PV,i} \leq P_{PV,i,\max} \quad (7)$$

式中: $P_{PV,i,\max}$ 是节点 i 处所接 PV 有功输出的最大值。

2.3 基于试探法的求解

本文根据试探法结合潮流计算求解所建立的模型, 主要求解不加入调压措施前和加入调压措施后各个节点所能承受的最大光伏容量, 具体的求解步骤如下所述。

1) 根据潮流算法计算出不加入调压策略前, 且保证每个节点电压不越限、潮流不过载的前提下, 各个节点能接入的光伏容量。

2) 用试探法不断增加光伏的接入容量, 得到各节点电压幅值和支路功率后, 判断电压是否越限、支路功率是否过载, 若两者均在安全约束的范围内, 则继续增大光伏接入容量, 直到发生越限为止, 并记录限制各个节点 PV 容量继续增加的原因。不加调压措施前的求解示意图如图 2 所示。

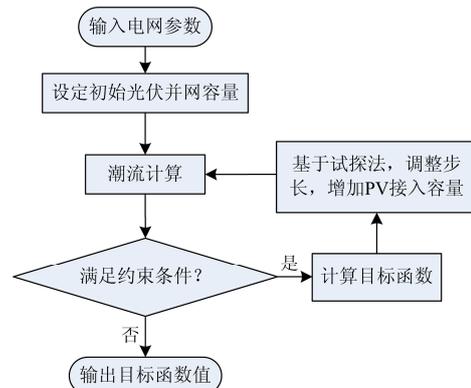


图 2 不加调压措施前 PV 最大消纳容量求解示意图

Fig. 2 Resolving flow chart of maximum PV accommodation capacity before adding voltage regulation measures

3) 得到不加措施前各个节点的最大光伏接入容量后, 分别加入 $\cos \varphi(P)$ 和 $Q(U)$ 两种调压措施, 然后继续增大所接节点的光伏容量。

4) 分别考虑用试探法不断增加这两种调压措施后的光伏接入容量, 得到各个节点所对应的最大光伏功率, 之后分别记录在两种调压措施下的最大光伏消纳容量, 其中加入调压措施后的求解示意图如图 3 所示。

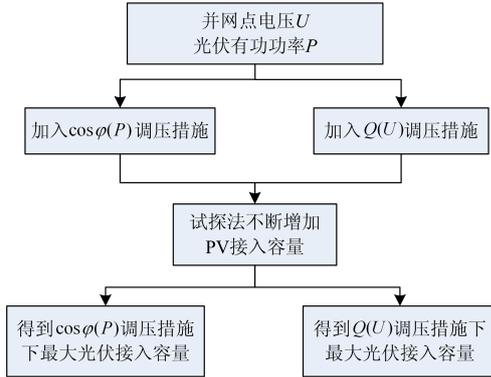


图 3 加入调压措施后 PV 最大消纳容量求解示意图

Fig. 3 Resolving flow chart of maximum PV accommodation capacity after adding voltage regulation measures

5) 绘制出不考虑调压措施前和考虑两种调压措施后各个节点最大光伏容量曲线图。

6) 对比所得到的曲线图, 分析加入调压措施后对光伏消纳能力的影响, 得出相应的结论。

3 算例分析

3.1 算例数据

本文采用 IEEE33 节点配电网系统作为算例, 该算例的电压等级为 12.66 kV, 基准功率为 10 MW, 总的有功负荷功率为 3.715 MW, 总的无功负荷功率为 2.3 Mvar, 支路功率为 6 MW, $U_{i,\min}=0.95U_N$, $U_{i,\max}=1.05U_N$, 首节点电压设定为 1.034 p.u., 该系统具体的网络结构如图 4 所示。

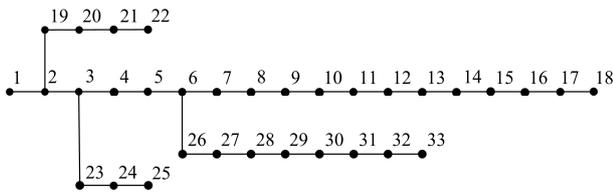


图 4 IEEE33 节点系统结构图

Fig. 4 IEEE33 nodes bus system configuration

3.2 不加调压措施前 PV 消纳能力研究

为了研究单个光伏接入不同位置时对 PV 消纳能力的影响。本文分别选取该馈线上的前中后节点 3、10、20、33 作为研究对象, 此时并未考虑调压措施。根据本文的方法, 分别计算出分布式光伏的准入容量, 结果如表 1 所示。

表 1 不考虑调压措施前单电源接入 PV 时的准入容量

Table 1 Penetration capacities of single PV generator without considering voltage regulation measures

| 并网节点 | 3 | 10 | 20 | 33 |
|---------|------|------|------|------|
| 准入容量/MW | 7.42 | 2.68 | 2.19 | 2.15 |

由表 1 可以看出: 随着并网节点从系统母线向馈线末端逐渐后移, 可接入的分布式光伏准入容量越来越小。上述 4 个节点接入最大容量光伏时, 系统电压分布趋势图如图 5 所示, 图中除了节点 3 接入最大光伏时没有发生电压越限外(此时支路功率达到上限值), 其他节点接入最大容量光伏时均有节点电压接近电压上限 1.05。

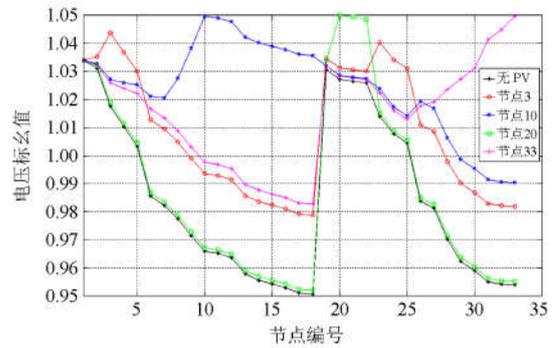


图 5 PV 并网点电压分布趋势图

Fig. 5 Profile of voltage distribution of grid-integrated PV

从图 5 的电压分布图可以看出, 对于上述配电网, 制约 PV 准入容量的主要原因是电压越限。当靠近系统母线处接入分布式光伏时, 其对系统的电压抬升作用有限; 而当 PV 并网点渐渐远离母线时, 分布式光伏对系统电压的支撑作用明显提高。因此可以看出在系统潮流不过载的情况下, 系统可以容纳的 PV 容量会随着并网点的后移而不断减少。此外, 本文通过计算找出了限制各个节点 PV 容量继续增大的原因, 如表 2 所示。

表 2 限制各个节点 PV 容量增大因素

Table 2 Restriction factors of PV capacity increasing on each node

| PV 并网点 | 限制因素 |
|--|--------|
| 2,3,4,19,23 | 支路功率过载 |
| 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18 | 电压越限 |
| 20,21,22,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33 | |

由表 2 可以看出: 在靠近系统母线处接入 PV, 其容量受到支路功率约束的限制, 而其余节点则受到电压约束的限制使其容量不能继续增长。这与上述分析的结论相一致, 电压越限是限制 PV 容量继

续增加最主要的原因。因此,可以根据各个节点限制因素的不同采取不同的措施,以此提高 PV 的接入容量。对于靠近系统母线的节点,可以通过对馈线前端的线路进行改造,增大线径来提高线路的容量,以此提升 PV 的消纳能力;对于远离系统母线的节点,可通过加入一些电压控制的主动管理措施来提高光伏的消纳能力。

图 6 为不加调压措施前 IEEE33 节点 PV 最大准入容量分布图,当靠近系统母线节点接入分布式光伏时,可接入的 PV 准入容量最大,曲线相对比较平稳。在支路 2-22、支路 6-33、支路 3-25 上 PV 接入容量同样都是呈下降趋势,由于节点 19、23、26 靠近系统母线,因此这三个节点的光伏准入容量又有所提高。而当并网点的位置逐渐远离系统母线的节点时,可接入的 PV 准入容量越来越小,可见这些节点受到电压的约束条件越来越明显。

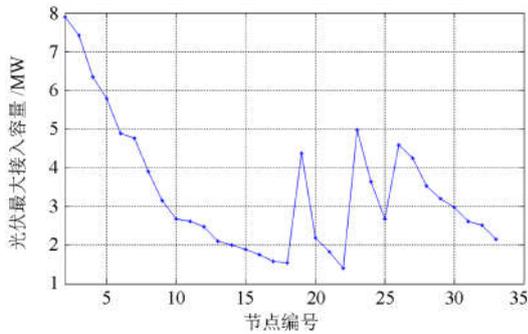


图 6 不加调压措施前 PV 最大准入容量分布图

Fig. 6 Maximum PV penetration capacity distribution before adding voltage regulation measures

通过上述分析,可见当不加入任何调压措施前,IEEE33 节点可接入的单个光伏电源最大容量不到 8 MW,且在馈线中间偏后节点处分布式光伏的接纳能力显著降低。当配电网末端节点电压较低时,可以选择接入适量的 PV 以起到改善电压的效果;当配电网需要消耗大量的 PV 时,可考虑在配电网的前段节点处接入 PV。

3.3 加入调压措施后 PV 消纳能力研究

由于系统本身消纳能力有限,为了提高系统的消纳能力,必须考虑加入相关的措施以提高分布式光伏的消纳能力。由上述分析可知,节点电压是否越限成为制约光伏消纳能力最重要的因素。因此,本文考虑加入两种调压措施来提高光伏的消纳能力,设计了以下两种方案:(1)加入基于并网点电压幅值 $Q(U)$ 调压措施;(2)加入基于光伏有功输出的 $\cos \varphi(P)$ 调压措施。基于前文分析,在这两种调压方案下,分别选择在中间偏后的节点处接入光伏,

并和不调压策略前的方案进行比较。各个方案下最大光伏接入容量计算结果如表 3 所示。

表 3 加入调压措施后单电源接入时 PV 准入容量

Table 3 Penetration capacities of single PV generator after adding voltage regulation measures

| 并网点 | 16 | 18 | 20 | 22 |
|---------------|------|------|------|------|
| 不加调压措施准入容量/MW | 1.76 | 1.58 | 2.19 | 1.41 |
| 方案 1 准入容量/MW | 2.21 | 2.07 | 2.65 | 1.95 |
| 方案 2 准入容量/MW | 2.03 | 1.85 | 2.44 | 1.75 |
| 文献[26]准入容量/MW | 1.88 | 1.72 | 2.32 | 1.66 |

为了验证本文方法的有效性,将本文方法的计算结果与文献[26]的仿真结果进行了对比,文献[26]考虑了有载调压变压器和并联电容器参与调压的情况,提出了改变变压器分接头以适应分布式光伏接入后的电压,基于遗传算法计算出光伏电源的极限功率。

由表 3 可以看出:加入调压措施后,在中间偏后节点处的光伏最大可接入容量明显提高,其中方案 1 基于 $Q(U)$ 调压措施,由于其根据电压直接调整光伏无功输出,针对性更强,使其光伏消纳能力提高的效果更明显。

加入调压措施前后及文献[26]中各个节点光伏最大接入容量分布对比如图 7 所示。

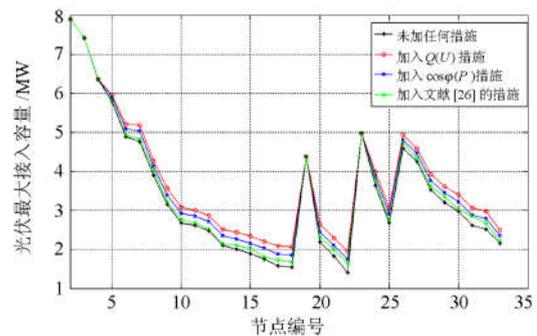


图 7 加入调压措施后 PV 最大准入容量分布图

Fig. 7 Maximum PV penetration capacity distribution after adding voltage regulation measures

从图 7 可以看出,加入两种调压措施后,光伏整体的消纳能力明显提高,尤其在中间偏后节点处加入调压措施对光伏消纳能力提高的效果最明显。但在靠近母线节点处加入调压措施未能起到提高光伏的消纳能力的作用,由于这些节点受到支路功率的限制,若继续增加这些节点的光伏容量,将会超出线路所能承受的范围,并对整个系统造成不利影响。在两种调压方案下, PV 功率提升最多的节点是 22 节点,其容量分别提高了 0.54 MW 和 0.2 MW。相比较于 $\cos \varphi(P)$ 调压措施, $Q(U)$ 调压措施对电压

控制的针对性更强, 对于提高光伏消纳能力的效果更好。对比文献[26]的仿真结果可以看出, 本文所提出的措施更有利于提高光伏消纳能力。主要原因是: 并联电容器集中分布在母线处, 而光伏是分散接入馈线处, 分散补偿的调压效果更好; 且并联电容器只补偿无功功率, 对负载较重引起电压偏低效果较好, 而本文所提出的 $Q(U)$ 调压措施既可以吸收无功功率又可以补偿无功功率, 调压范围相对更广, 因此其对于提高光伏消纳能力的效果也更好。

4 结论

PV 并网改变了配电网的潮流方向, 若 PV 接入容量过大会造成电压越限、潮流过载等问题的发生, 不利于配电网的安全稳定运行。本文以分布式光伏最大准入容量为目标函数, 以节点电压、线路潮流等为约束条件建立了相应的模型, 通过考虑加入调压措施来提高分布式光伏的消纳能力。以 IEEE33 节点配电网为算例, 结果表明加入调压措施后可以有效地提高分布式光伏的消纳能力, 其中考虑 $Q(U)$ 调压措施的消纳能力提高效果要优于考虑 $\cos \varphi(P)$ 调压措施, 且越靠近线路末端, 电压控制措施对光伏接纳能力的改善效果越好。同时本文还总结了限制各个节点光伏接入容量增大的原因。

参考文献

- [1] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [2] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(21): 132-135, 140.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. The integrated evaluation of impact of distribution generation on distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(21): 132-135, 140.
- [3] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(9): 1-8.
JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(9): 1-8.
- [4] 王海超, 周双喜, 鲁宗相. 基于相关规划理论的风电最大接入容量计算[J]. *现代电力*, 2009, 26(3): 54-57.
WANG Haichao, ZHOU Shuangxi, LU Zongxiang. Calculation of wind power penetration level based on dependent chance goal programming[J]. *Modern Electric Power*, 2009, 26(3): 54-57.
- [5] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. *电网技术*, 2002, 26(8): 8-11.
SHEN Hong, LIANG Jun, DAI Huizhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis[J]. *Power System Technology*, 2002, 26(8): 8-11.
- [6] KIM T E, KIM J E. A method for determining the introduction limit of distributed generation systems in distribution system[C] // *Proceedings of IEEE PES Summer Meeting*, July 15-19, 2001, Vancouver-British Columbia, Canada: 456-461.
- [7] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(6): 25-28.
LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua, et al. An optimization method for determining wind power penetration limit in power system under static security constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(6): 25-28.
- [8] 欧阳聪, 刘明波. 考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(5): 17-23.
OU Yangcong, LIU Mingbo. Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(5): 17-23.
- [9] 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.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 1-14.
- [10] 程超, 高厚磊, 邹贵彬, 等. 提升分布式电源接纳能力的配电网一次设备改造[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(6): 102-107.
CHENG Chao, GAO Houlei, ZOU Guibin, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(6): 102-107.
- [11] 汤奕, 鲁针针, 伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 29(24): 49-55.
TANG Yi, LU Zhenzhen, FU Xiangyun. Demand response strategies for promoting consumption of distributed power generation with residential active loads[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 29(24): 49-55.

- [12] KAWAMURA K, KATO R, BANDO S, et al. Applicability of demand response to voltage control in a distribution system with large integration of rooftop PV[C] // 2013 IEEE Energytech, May 21-23, 2013, Cleveland, OH, USA: 1-6.
- [13] 赵波, 韦立坤, 徐志成, 等. 计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 34-40.
ZHAO Bo, WEI Likun, XU Zhicheng, et al. Photovoltaic accommodation capacity determination of actual feeder based on stochastic scenarios analysis with storage system considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 34-40.
- [14] NADEESHANI J. PETER W. MOHAMMAD A S M. An optimal management strategy for distributed storages in distribution networks with high penetration of PV[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(11): 147-157.
- [15] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
HU Hua, WU Shan, XIA Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [16] 黄巍, 吴俊勇, 鲁思棋, 等. 考电压偏差和谐波约束下配电网光伏最大渗透率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 49-55.
HUANG Wei, WU Junyong, LU Siqi, et al. Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 49-55.
- [17] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.
XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distributed networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [18] JANHANGIRI P, ALIPRANTIS D C. Distributed Volt/Var control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3429-3439.
- [19] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 971-975.
WANG Yibo, LI Jing, XU Honghua. Analysis of the maximum installed capacity of PV station constrained by power system security and stability[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2008, 29(8): 971-975.
- [20] 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.
WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [21] BRAUU M, STETZ T, REIMANN T, et al. Optimal reactive power supply in distribution networks-technological and economic assessment for PV systems[C] // European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, September 21-25, 2009, Hamburg, Germany: 3872-3881.
- [22] GEIBEL D. Multifunctional photovoltaic inverter systems-energy management and improvement of power quality and reliability in industrial environments[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2009, San Jose, CA, USA: 3881-3888.
- [23] CRACIUN B-I, MAN E A, MURESAN V A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks[C] // Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 25-28, Aalborg Denmark: 775-781.
- [24] STETZ T, YAN W, BARUU M. Voltage control in distribution systems with high level PV penetration (improving absorption capacity for PV systems by reactive power supply)[C] // 25th European PV Solar Energy Conference and Exhibition. September 6-10, 2010, Valencia, Spain: 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion: 5000-5006.
- [25] 丁明, 刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 922-926.
DING Ming, LIU Sheng. Calculation of maximum penetration level of multi PV generation systems based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 922-926.

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-09-26

作者简介:

李振坤(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为配电网规划及其运行控制、分布式电源并网及微电网;
E-mail: lzk021@163.com

鲍新雨(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网接纳分布式光伏能力分析。E-mail: 492851593@qq.com

(编辑 姜新丽)