

文章编号:1005-0523(2020)05-0115-06

电压约束的台区分布式光伏最大接入容量研究

钟化兰,熊珂,刘珺

(华东交通大学电气与自动化学院,江西 南昌 330013)

摘要:提出了一种以电压为约束条件的台区配电线路可消纳光伏容量快速评估方法。解决了台区配电线路的电压重过载问题。该方法通过分析光伏发电接入时线路电压的变化并建立其最大容量的评估模型,该模型的主要参数为灵敏度系数,通过求出各个线路的灵敏度系数,再利用多元线性回归法得出最大容量对各个线路参数的影响,通过对线路是否重过载的判定一定程度上实现了对台区可接入最大光伏的预测。最后对湖溪塔元公变台区、湖溪中格田台区进行实验验证了该模型的有效性。

关键词:分布式光伏;线性回归评估模型;最大光伏容量

中图分类号:F224-39

文献标志码:A

本文引用格式:钟化兰,熊珂,刘珺.电压约束的台区分布式光伏最大接入容量研究[J].华东交通大学学报,2020,37(5):118-123.

Citation format:ZHONG H L,XIONG K,LIU J. Research on the maximum access capacity of distributed photovoltaic in substation area with voltage constraint[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(5):118-123.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.017

与传统的远距离输电方式相比,分布式光伏接入配电网之后降低了成本和功耗,将能源就地消纳,但是大量的使用分布式光伏并网会导致整个配电系统变为多电源系统,引起系统潮流和电压分布的变化。由于典型居民用电负荷与光伏发电在高峰时段可能存在不匹配问题,造成电压越上限的情况,从而增加线路损耗,影响系统正常运行。所以,解决光伏发电带来的各种隐患变得尤为重要。

目前各国已经对配电网电压控制进行了大量的研究。贺新禹,等^[1]提出了一种新的无功有功协调控制策略,根据电压幅值对节点电压进行分区,按照无功功率调控策略对配电网进行无功补偿使电压更趋于理想范围。姚宏民,等^[2]提出了一种采用蒙特卡洛随机法模拟评估配电网的光伏消纳能力,并提出基于光伏逆变器的电压阶段控制策略以缓解电压越限问题。范元亮,等^[3]研究了光伏模块的输出趋势曲线,并尝试使用函数的方法揭示不产生过电压情况下,光伏的最大允许接入容量。目前,光伏定容研究通过建立配电线路光伏及负荷的概率潮流模型,以容量最大、配电网对主网电能需求最小、电网年运行费用最低、环境效益等多个因素为目标,利用遗传算法^[4]、粒子群算法、生物地理学优化算法^[5]、启发式人工鱼群算法等人工智能算法进行求解。然而这些方法的验证效果未知。在此背景下,提出一种台区配电线路光伏接入容量评估模型与方法。通过灵敏度分析,得出线路可消纳的最大光伏容量,求出线路各个参数的灵敏系数,从而求出在不过载的情况下可接入的最大光伏容量。

1 分布式发电对配网电压影响机理

1.1 单个光伏发电接入的情况

线路上带有 N 个用户,第 n 个用户视在功率为 $P_n + jQ_n$ ($n = 1, 2, \dots, N$), P_n 和 Q_n 分别为视在功率的实部和虚部,其中 P_n 的单位为 MW,线路上第 n 户所在位置电压为 U_n ($n = 1, 2, \dots, N$),第 $n-1$ 和 n 个用户之间线路阻抗为 $R_{n+1} + jX_n = l_n(r + jx)$,其中 l_n 为第 $n-1$ 和 n 个用户之间线路的长度, r 和 x 分别为单位长度线路的电阻和电抗,用户 p 接入的建筑光伏容量为 P_p 。

收稿日期:2020-05-08

基金项目:江西省科技厅重点研发计划(20192BBE50017)

作者简介:钟化兰(1967—),男,副教授,研究方向为数据采集与监控,铁路牵引供电信息化。E-mail:707005499@qq.com。

1) 光伏发电接入之前,定义有功功率和无功功率向负载方向流动为正值反之为负值,光伏发电 P_v 接入前,第 m 与 $m-1$ 个用户之间压降为

$$\Delta U_m = U_m - U_{m-1} = -\frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{U_{m-1}} \approx -\frac{\sum_{n=m}^N P_n r_l m + \sum_{n=m}^N Q_n x_l m}{U_{m-1}} \quad (1)$$

此等式中忽略了两项,电压降的虚部即横分量(对整个电压降落的幅值影响较小);后续各段线路上的有功、无功损耗(远小于各节点的负荷功率)。光伏接入前,线路上的电压随着与初始点距离的增大而降低。所有线路上第 m 个用户处的电压 U_m 为

$$U_m = U_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{k=1}^N P_n r_l n + \sum_{k=1}^N Q_n x_l n}{U_{n-1}} \quad (2)$$

式中, U_0 为线路初始端电压。

2) 光伏发电接入后,用户位于光伏接入点前时,即 $0 < m < p$, 电压为

$$U_m = U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_v r_l k) + \sum_{n=k}^N Q_n x_l k}{U_{k-1}} \quad (3)$$

由于居民用电功率因数很高,且线路电抗较小,可忽略无功功率的作用,简化后 m 点电压为

$$U_m = U_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{k=1}^N (p_n - p_v) r_l n}{U_{n-1}} > U_0 - \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{k=1}^N n p_n r_l n}{U_{n-1}} \quad (4)$$

由上述可知,光伏发电接入后对线路电压有一定的提升作用,且提升幅度与线路参数、用户负荷大小、光伏发电出力及其接入位置密切相关。第 m 户和第 $m-1$ 户之间的电压差为

$$U_m - U_{m-1} = -\frac{\sum_{n=m}^N (P_n - P_v) r_l n}{U_{m-1}} \quad (5)$$

从上式可知,当 m 户与后面的用户有功功率和大于光伏发电容量时,电压降低;当 m 户与后面的用户有功功率和小于光伏发电容量时,电压则升高。

3) 光伏发电接入后。用户位于光伏接入点后时,即 $p < m$, 第 m 户和第 $m-1$ 户之间的电压差为

$$U_m - U_{m-1} = -\frac{\sum_{n=m}^N P_n r_l n}{U_{m-1}} < 0 \quad (6)$$

由上式可知, m 点电压始终小于 $m-1$ 点电压,电压降低。

综上,假设线路初始端电压不变,单个光伏发电接入后,随着光伏出力的逐渐增加,线路电压变化趋势如下:逐渐降低;先降低后升高,再降低;先升高后降低。在后 2 种情况下,光伏发电接入点电压为局部电压最高点,电压为

$$U_p = U_0 - \sum_{n=1}^p \frac{\sum_{k=1}^N (P_n - P_v) r_l k}{U_{k-1}} \quad (7)$$

光伏接入点电压 U_p 必须小于电压偏差要求的最大电压 U_{\max} , 整条线路上电压才能满足要求,由此则可确定线路最大接入光伏容量。

1.2 多个光伏发电接入的情况

线路上有多个用户均装有屋顶光伏,没有建设屋顶光伏的用户光伏发电容量按 0 考虑。

所有光伏发电接入后,同理忽略无功功率作用后 m 点电压为

$$U_m - U_{m-1} = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{vn})rl_k}{U_{k-1}} - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{vn})rl_k}{U_{k-1}} = - \frac{\sum_{n=m}^N m(P_n - P_{vn})rl_m}{U_{m-1}} \quad (8)$$

式中, P_{vn} 为第 n 个用户接入光伏发电的容量。由上式可知, m 点和 m 点向后所有负荷有功功率之和大于所有光伏发电功率之和时,电压降低; 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。线路上的最高电压视具体分布情况而定,若要满足光伏接入后不出现高电压情况,则其值应小于电压偏差规定的最高电压 U_{\max} 。

2 以电压为约束条件的台区分布式光伏最大容量评估模型

2.1 集中单个接入光伏容量线性化评估模型

分布式光伏最大接入容量的约束条件为电压不越上限,则各个用户的节点电压都不能超过上限值。由前文分析可知,各节点电压与 V_0, P, Q, R, X 有关,各节点电压可写作

$$V = V(V_0, P, Q, R, X) \quad (9)$$

对上述线路电压计算式进行迭代线性化。设参数的初始估计值均为 1,则将函数在初始值附近进行泰勒级数展开,并取其线性近似,可得

$$V(V_0, P, Q, R, X) = V(1, 1, 1, 1, 1) + \frac{\partial V}{\partial V_1} \Big|_{(V_1-1)} + \frac{\partial V}{\partial P_1} \Big|_{(P-1)} + \frac{\partial V}{\partial Q_1} \Big|_{(Q-1)} + \frac{\partial V}{\partial R_1} \Big|_{(R-1)} + \frac{\partial V}{\partial X_1} \Big|_{(X-1)} \quad (10)$$

其中

$$V(1, 1, 1, 1, 1) = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial V_1} \Big|_{i=1} = \frac{1}{\partial V_1^2}, \frac{\partial V}{\partial P_1} \Big|_{i=-1}, \frac{\partial V}{\partial Q_1} \Big|_{i=-1}, \frac{\partial V}{\partial R_1} \Big|_{i=-1}, \frac{\partial V}{\partial X_1} \Big|_{i=-1}$$

代入上式,得

$$V = V(V_0, P, Q, R, X) = 3V_1 + \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_1^2} - P - Q - R - X \quad (11)$$

在实际线路中有

$$P = P_l + \Delta P - P_1 \quad Q = Q_l + \Delta Q - Q_1 \quad (12)$$

式中: P_l, Q_l 与线路负载率及功率因数成线性关系; $\Delta P, \Delta Q$ 为线路与变压器损耗,与变压器容量及线路阻抗成线性关系,从而可得节点电压与负载率、功率因数和变压器容量成线性关系。

对于 R, X 变量,有

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \frac{r}{S} \times l \\ X &= 2\pi f L \times l = m_0 f l \left(\ln \frac{2l}{S} - 1 \right) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: L 为电感, μ_0 为真空磁导率,由于线路长度 l 与线径面积 S 的波动范围较小,可认为 R, X 与 l, S 在该范围内近似成线性,即节点电压与 l, S 为近似线性关系。

对于 V_0 变量,令 $Z = V_0 + \frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_0^2}$, $\frac{1}{V_0^2}$ 量级较小,可省略,对于 $Z = V_0 + \frac{1}{V_0}$,当 $V_0 > 1$ 时, Z 随 V_0 单调递增,由 V_0 一般在 0.4~0.428 区间波动,则在该范围内可将 Z 与 V_0 的关系近似线性化,即可认为配电线路节点电压 V 与 V_0 呈线性关系。

综上可得,在台区配电线路中,节点电压与实际线路参数:线路长度 l ,线径面积 S ,线路平均负载率 β ,变压器容量 S_T 成线性关系,因而提出基于电压约束的配电线路光伏电源接入容量线性化评估模型

$$l = C + a_1 l + a_2 S + a_3 \beta + a_4 S_T \quad (14)$$

式中:线路参数以标么值表示, A_1, A_2, A_3, A_4 分别为对应参数的系数; C 为修正系数

评估模型的约束条件为

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, i \in N \quad (15)$$

式中, N 为台区线路节点集。

2.2 单个接入光伏容量系数及修正参数确定

在基态线路模型的基础上(配变 50 kW, 线径 LGJ-25 mm², 供电半径 1 km, 10% 的负载率), 保持其他变量不变, 依次修改线路的特征参数, 通过潮流计算得到当电压不越上限时配电线路的最大接入容量, 并求出光伏最大接入容量与各变量: 供电半径、线径、配变容量以及负载率的函数关系式, 经数据曲线拟合, 可获得光伏消纳比对该参数的灵敏度。

由此获得光伏消纳比对该参数的灵敏系数如表 1 所示。

表 1 光伏消纳比对该参数的灵敏度
Tab.1 Sensitivity of PV absorption ratio to the parameter

线路参数	线路长度 l/kW	线径面积 S/km^2	线路负载率 β	配变容量 S_T/kW
架空线路	-0.117 44	0.038 98	0.099 24	0.100 50

设

$$X=[1, l, S, \beta, S_T] \quad (16)$$

根据前面的分析可知, 光伏消纳比与线路参数基本呈线性关系, 因而各个参数可认为是解耦的。在此基础上, 进行统一目标的多元线性回归拟合, 得到架空线路的光伏消纳比评估公式为

$$\beta_L = CX \quad C=[C_0, a_1, a_2, a_3, a_4] \quad (17)$$

当光伏电源越接近线路首端时, 可消纳的光伏极限容量越大, 为避免评估结果过于保守, 引入位置修正系数 C_p 对上式的结果进行修正, 得

$$\beta'_L = C_p b_L \quad (18)$$

β'_L 为考虑光伏电源接入位置的线路可消纳光伏极限容量。参数 C 由多元线性回归拟合获得, C_p 由光伏电源接入不同位置的光伏消纳比与光伏电源接入末端的光伏消纳比相比获得, 经计算, C_p 取值见表 2。

表 2 光伏接入位置系数
Tab.2 Coefficient of photovoltaic access location

光伏接入位置	0-1/2 段	1/2-3/4 段	3/4 末段
架空线路 C_p	1.3	1.1	0.95

故考虑位置因素 β'_L 的具体取值如下

$$\beta'_L = [2.67, -0.117 4, 0.038 98, 0.100 5]$$

2.3 分散式接入光伏容量评估模型

单个光伏集中接入的场景, 适用于考虑台区最坏接入情况。但是台区光伏接入往往是多点分散式接入, 为了充分利用光伏消纳能力, 提高清洁能源发电量, 本节中建立一种台区分散式接入光伏容量评估模型以更好的计算台区光伏最大接入容量。

本节中, 采用图 2 的系统为例, 线路电压等级为 380 V, 线路型号为 LGJ-25 mm², 线路上共有 10 个用户接入。在基态线路模型的基础上, 保持其他变量不变, 依次修改线路的特征参数, 通过潮流计算得到当电压不越上限时配电线路的光伏最大接入容量。

表 3-表 5 分别阐述了不同线径、不同线长、不同配变容量以及不同负载下的最大光伏接入容量。

表 3 不同线径下光伏最大接入容量变化
Tab.3 Variation of PV maximum access capacity under different wire diameters

线径型号	LJG-25	LJG-35	LJG-50	LJG-70	LJG-95	LJG-95
最大光伏接入功率 /kW	1.9	2.4	2.7	3.1	3.4	3.6

表4 不同配变容量下光伏最大接入容量变化

Tab.4 Variation of PV maximum access capacity under different distribution variable capacity

变压器容量 /kW	30	50	80	100	125	160
最大光伏接入功率 /kW	1.65	1.9	2.4	2.7	3	3.35

表5 不同供电半径下光伏最大接入容量变化

Tab.5 Variation of PV maximum access capacity under different power supply radii

供电半径/m	270	360	450	540	630	720
最大光伏接入功率/kW	1.9	1.64	1.45	1.32	1.24	1.14

分析表格中数据,利用数据拟合可分别求出光伏最大接入容量与各变量:线径、供电半径、配变容量以及负载率的函数关系式,可由此获得光伏消纳比对该参数的灵敏度。接着我们通过相同的方法对最大接入容量随供电半径变化求出对应的拟合曲线。其中, y 为每户接入容量, x 为基值10%的负载率。拟合曲线可得: $y=0.010\ 04x+0.028\ 09$;故 β_L' 的具体取值为: $\beta_L'=[4.57,-0.087\ 93,0.084\ 51,0.100\ 4,0.134\ 5]$ 。

3 有效性验证

以湖溪塔元公变台区、湖溪中格田台区为例,两台区目前已接容量分别为15,30 kW。湖溪塔元公变台区参数为:供电半径为614 m,配变容量为30 kW,配变档位为3档,供电线径25 mm²;湖溪中格田台区,供电半径达1 100 m,配变容量为30 kW,供电线径为25 mm²。根据台区线路现况,将参数供电半径、线型、线径、负载率、配变高压侧电压、配变档位、配变容量、接入位置输入EXCEL中。通过台区分布式光伏最大接入容量计算软件可计算出最大容量。表6(最大接入容量一栏)为软件计算结果。由结果可知,湖溪塔元公变台区、湖溪中格田台区最大接入容量分别为7,20 kW。表明当前接入容量超出可接最大接入容量。

为了改善超出最大接入容量所带来的配电网高电压问题,根据第2章节中讨论的影响光伏接入容量因素,考虑改造配变容量、线径等条件,运用软件重新计算,可推导出在满足已接光伏容量下线路所需的改造,如表1所示。对比改造前后台区的接入容量,改造后可接最大容量分别为18,36 kW,超出了已接容量,满足不出现高电压的要求。

表6 台区改造前后光伏容量对比

Tab.6 Comparison of photovoltaic capacity before and after substation transformation

台区名称	湖溪塔元	湖溪中格田
供电半径/m	614	1 100
供电线径/mm ²	25	25
配电容量/kW	30	30
负载率/%	21	48%
已接入容量/kW	15	30
最大接入容量/kW	7	20
改造方案	线径改为95 mm ² , 容量改为50 kW	线径95 mm ² , 供电半径500 m
改造后可接入容量/(kV·kW)	18	36

4 结论

本文针对分布式光伏可接入最大容量问题做出了一系列研究。根据配电线路的特点建立了2个数据模型;求出了光伏最大接入容量与线径、供电半径、配变容量以及负载率的函数关系式;经数据曲线拟合,求出

了参数灵敏度;最后利用已有的计算软件对模型进行了验证。由结果可知,该方法有一定的合理性和时效性。后续还将对源头问题做一些研究,从电压等级、接线方式、调控手段等方面入手,重点加强设计评审和接入评估。将问题解决在初始阶段。对还未接入的光伏扶贫项目,做好在接入前的光伏容量评估工作。从源头把光伏接入对配电网电压带来的影响降到最低。

参考文献:

- [1] 贺新禹,陈众,刘星,等. 含分布式光伏发电的中压配电网电压控制策略[J/OL]. 电测与仪表:1-8[2020-09-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200429.1539.006.html>.
- [2] 姚宏民,杜欣慧,李廷钧,等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术,2019,43(2):125-132.
- [3] 范元亮,赵波,江全元,等. 过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):40-44.
- [4] 管晟超,任明珠,谭佳,等. 基于谐波约束的配电网光伏最大准入容量计算[J]. 电网与清洁能源,2016,32(2):89-95.
- [5] 栾伟杰,蒋献伟,张节潭,等. 考虑主动管理的分布式光伏发电消纳能力研究[J]. 电力建设,2016,37(1):137-143.
- [6] 黄巍. 电能质量约束下主动配电网光伏最大渗透率研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [7] 谢小英,赵美超,邢劲,等. 一种计算分布式光伏并网最大准入容量的方法[P]. CN106682780A,2017-05-17.
- [8] 李琼,范瑞祥,王华云,等. 一种区域分布式光伏最大容量接入评价方法[P]. CN107230999A,2017-10-03.
- [9] 王文宾,马振宏,李会彬,等. 分布式光伏并网准入容量的规划方法及系统[P]. CN108092320A,2018-05-29.
- [10] 宋学伟,刘天羽,江秀臣,等. 基于改进鱼群算法与最小二乘支持向量机的短期负荷预测[J]. 电气技术,2019,20(11):20-26.
- [11] 甘雯,徐晴,沈诚亮,等. 基于鲁棒优化的配电网中分布式光伏准入容量研究[J]. 应用科技,2019,46(6):53-62.
- [12] 梦佳,梁龙金,姜文,等. 考虑电能质量约束的配电网光伏最大准入容量研究[J]. 电子质量,2019(3):9-12.
- [13] 袁方方,赵江信,郭宝甫,等. 分布式光伏电源与配电网协调控制策略研究[J/OL]. 电测与仪表:1-9[2020-09-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200430.1610.016.html>.
- [14] SHI Y CH, HE W G, ZHAO J, et al. Expected output calculation based on inverse distance weighting and its application in anomaly detection of distributed photovoltaic power stations[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(253):119965.
- [15] BAJAY S V, JANNUZZI G M, et al. Impacts of photovoltaic distributed generation and energy efficiency measures on the electricity market of three representative Brazilian distribution utilities[J]. Energy for Sustainable Development, 2020(54):60-71.

Research on the Maximum Access Capacity of Distributed Photovoltaic in Substation Area with Voltage Constraint

Zhong Hualan, Xiong Ke, Liu Jun

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper proposes a fast assessment method of the photovoltaic capacity that can be absorbed by the distribution lines in the station area with voltage as the constraint condition. The problem of voltage overload of the distribution line in the station area is solved. This method analyzes the change of line voltage when photovoltaic power is connected and establishes an evaluation model of its maximum capacity. The main parameter of this model is the sensitivity coefficient. The sensitivity coefficient of each line parameter is calculated, and then the influence of maximum capacity on each line parameter is obtained by using multiple linear regression method. The influence of capacity on the parameters of each line can be predicted to a certain extent by judging whether the line is heavily overloaded or not. Finally, experiments on the Huxi Tower Yuangong Substation and the Huxi Zhonggetian Platform verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: distributed photovoltaic; linear regression evaluation model; maximum photovoltaic capacity