

基于灵活网架的分布式光伏电源准入容量研究

叶斌¹, 朱泽安², 马静¹, 代磊¹, 王承民², 侯四维³

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 合肥 230022;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 上海博英信息科技有限公司, 上海 200240)

摘要:分析推导了分布式光伏电源接入区域配电网的影响,在此基础上,考虑主动配电网背景下的灵活网架,以一系列静态安全稳定指标作为约束,建立了分布式光伏电源准入容量求解模型。将单个以及多个光伏电源接入的情况分开求解,相应地分别采用基于二分法的枚举法以及混合智能遗传算法求解,保证了模型求解的高效性。利用所提模型、算法,对10 kV中压配电网的几种典型网架接线进行分布式光伏电源准入容量的计算、比较、分析,验证了方法的有效性,总结了相关规律,提出了建议。

关键词:光伏发电;灵活网架;接入容量;配电网;静态安全

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.011.001

中图分类号:TM71

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2019)11-0001-07

Research on permitted penetration capacity of distributed PV generation based on flexible network structure

Ye Bin¹, Zhu Ze'an², Ma Jing¹, Dai Lei¹, Wang Chengmin², Hou Siwei³

(1. Institute of Economic and Technology, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China. 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China. 3. Shanghai Proinvent Information Tech Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The impact of grid-connected distributed PV generation on regional distribution network is analyzed in this paper. On this basis, considering flexible network structure under the background of active distribution network, a model calculating the permitted penetration capacity of distributed PV generation is established, with a series of static security indexes adopted as constraints. Enumeration method based on dichotomy as well as hybrid intelligent algorithm is proposed to solve the model containing single PV generation and multi PV generations respectively, which ensures high efficiency of the model. The model and the algorithm proposed are applied in calculating, comparing and analyzing the permitted penetration capacity of distributed PV generation in several representative connection modes of medium voltage distribution network. Through the case study, the effectiveness of the proposed method is verified, some regularities are summarized, and relevant suggestions are propounded.

Keywords: photovoltaic generation, flexible network structure, permitted capacity, distribution network, static security

0 引言

随着环境问题的日益加剧以及可持续发展理念的深入人心,以风、光等清洁能源为代表的发电形式——分布式电源(Distributed Generation, DG)的广泛接入,已成为当前配电网的主流发展趋势。分布式光伏电源作为DG在中低压配电网的主要成分,其并网、尤其是大规模地接入电网将给配电网规划、运行造成显著的影响^[1-2]。一方面,分布式光伏电源出力的不确定性会

给负荷预测^[3]与配电网运行状态的确定^[4]带来阻碍;另一方面,分布式光伏电源的并网使得配电网由原有的单一辐射状无源网络转变为多源-荷共存的有源网络,改变潮流分布,从而在电能质量^[5-6]、继电保护^[7]、网络损耗^[8]等方面对配电网的安全、可靠、稳定性产生影响。因此,对于高渗透率的分布式光伏接入配电网方面的研究,是极具意义的。

对分布式光伏电源准入容量方面的研究,可以指

导分布式光伏电源的选址定容工作,也可为网架规划的未来发展方向提供一定依据。目前对分布式光伏电源接入配电网方面的研究主要着眼于电压部分^[9-13],其中:文献[9-11]探讨了分布式光伏发电接入中低压馈线对电压分布的影响,提出了一些解决方案;文献[12-13]以电压偏差、电压波动为约束,推导分析了不同负荷及分布式光伏分布情形下的光伏电源准入容量,但负荷与光伏电源分布的连续化处理与实际具有一定偏差;文献[14]从电压稳定裕度方面着手,对分布式光伏发电的准入容量进行了探讨,并将其应用于选址定容工作。但是,分布式光伏电源接入配电网的约束因素是多样的,仅从电压层面进行探讨具有一定的限制性。文献[15]考虑了网架结构的限制,但其不允许潮流倒送的前提显得过于保守。在符合系统安全、稳定性的前提下,应允许一定电能反送至上级电网。

主动配电网是未来配电网的另一重要发展方向。在主动配电网中,由于大量引进可控元件,虽然配电网的安全、稳定、灵活性得到进一步提升,但与此同时运行方式呈现复杂、多变化。即使是在无故障的情况下,也需进行自动控制的操作。因此,主动配电网中由馈线、开关等组成的网架结构,往往也是多变的。分布式光伏电源常依托于屋顶建设,其出力难以控制。若其规划、运行仍按照传统配电网的原则,在非正常(故障)运行方式下切除光伏电源,待到故障修复,恢复正常运行方式后再并入电网,则会造成非常严重的弃光率。因此未来分布式光伏电源的建设应考虑到多变的网架结构,目前还尚未有论文提及此因素。

本文首先对分布式光伏电源接入的配电网馈线进行了潮流、电压方面的推导分析,而后在静态安全约束的基础上,考虑灵活网架,建立了分布式光伏电源准入容量求解模型。针对单个及多个分布式光伏电源接入的场景,分别给出相应的算法以保证高效性。最后将提出的模型应用于网架分析评估,从接纳分布式光伏容量最大的角度出发,对典型网架进行比较,提出了一些建议。

1 分布式光伏电源接入对区域配电网的影响

1.1 潮流

由于配电网须遵循“开环运行”的原则,在正常运行方式下,配电网的结构为辐射状线路,馈线可以等效为一个单电源辐射状的结构,如图1所示,总节点数为 n 。考虑到大多数情况下,分布式光伏电源依托用户屋顶建设,与负荷的分布规律较为接近,因此,该模型的分布式光伏接入节点与负荷节点相同。

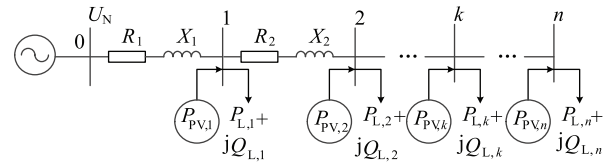


图1 含分布式光伏的典型配电网结构

Fig. 1 Typical distribution network structure with distributed photovoltaic

为更直观反映分布式光伏的接入对潮流分布的影响,定义“净负荷” $P'_{L,i}$,如式(1)所示。

$$P'_{L,i} = P_{L,i} - P_{PV,i} \quad (1)$$

式中 $P_{L,i}$ 为节点 i 的负荷有功功率; $P_{PV,i}$ 为接在节点 i 的分布式光伏电源出力。

当 $P'_{L,i}$ 为正时,代表节点 i 从系统吸收电能;当 $P'_{L,i}$ 为负时,代表节点 i 向系统输送电能;当 $P'_{L,i}$ 为0时,代表节点 i 与系统间无功率流动。对于未接入光伏电源的节点, $P_{PV,i}$ 等于0即可。

馈线支路中的潮流方向以及量值如式(2)所示:

$$P_{i-1,i} = \sum_{k=i}^n P'_{L,k} \quad (2)$$

式中 $P_{i-1,i}$ 代表节点 $i-1$ 与节点 i 间支路的有功功率,为正代表正向潮流(由节点 $i-1$ 流向 i),为负代表反向潮流(由节点 i 流向 $i-1$)。

考虑到光伏输出功率基本上为有功功率,式(1)、式(2)仅列举了系统中有功功率潮流的表达式。无功功率表达式与有功类似,仅将 P 替换为 Q ,并令光伏电源的 Q 等于0即可。

1.2 电压

对于图1所示的配电网辐射状分析模型,根据前推回代法可计算得节点 m 的电压值:

$$U_m = U_0 - \sum_{j=1}^m \frac{P_{j-1,j}R_j + Q_{j-1,j}X_j}{U_N} = U_0 - \sum_{j=1}^m \sum_{i=j}^n \frac{P'_{L,i}R_j + Q'_{L,i}X_j}{U_N} = U_0 - \sum_{j=1}^m \sum_{i=j}^n \frac{(P_{L,i} - P_{PV,i})R_j + Q_{L,i}X_j}{U_N} \quad (3)$$

式中 U_0 代表馈线出口处始端电压; U_N 代表线路额定电压; R_j, X_j 代表节点 j 至上游节点 $j-1$ 的线路电阻、电抗,如图1中所示。

馈线的节点电压需满足电压偏差在允许范围内及电压波动不越限,本文从静态安全约束出发,只考虑电压偏差约束,而不考虑电压波动约束。

2 分布式光伏电源准入容量求解模型的构建

本节构建的分布式光伏电源准入容量求解模型,

需考虑三个关键因素:

1) 约束分布式光伏接入容量的因素为系统静态安全稳定因素, 诸如线路载流量、节点电压约束等;

2) 在符合系统安全、稳定性的前提下, 电能允许反送至上级电网;

3) 馈线间有联络线相连时, 需考虑灵活网架的影响, 分布式光伏的接入容量应满足在各运行方式(网架结构)下均符合系统的静态安全稳定要求。

对于第 3 点所提灵活网架结构, 由联络开关与分段开关的开断状态决定。图 2 以 10 kV 电压等级中常见的 3 分段单联络结构为例, 展示了几种灵活网架结构(不考虑供电半径)。1~3 与 5~7 为分段开关, 4 为联络开关。正常运行方式(a)下, 分段开关闭合, 联络开关断开; 其他运行方式图 2(b)~图 2(d)下, 分段开关 1~3 分别断开, 联络开关闭合。

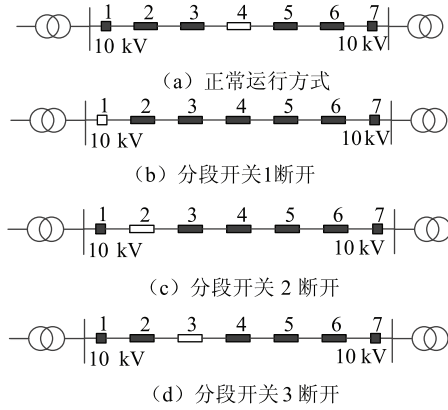


图 2 三分段单联络架空线结构灵活网架示例
Fig. 2 Example of flexible network structure with 3 sections and single link

2.1 目标函数

模型的目标函数为馈线所接入的分布式光伏电源容量最大为:

$$\max \sum_{k=1}^M P_{PV, m_k} \quad (4)$$

式中 M 代表计划建设的分布式光伏电源总数; m_k 代表第 k 个分布式光伏电源位于的节点编号, $m_k \in [1, N]$ 。

2.2 约束条件

(1) 潮流约束:

$$P_{PV, i} - P_{L, i} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{PV, i} - Q_{L, i} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

式中 N 代表研究的馈线节点总数; U, θ 代表节点电

压与相角; G, B 分别代表节点导纳矩阵的实部与虚部。

(2) 线路载流量约束:

$$|I_{ij}| \leq \zeta I_{ij, \max} \quad (7)$$

式中 $|I_{ij}|$ 代表流经线路 $i \sim j$ 的电流幅值; $I_{ij, \max}$ 代表线路 $i \sim j$ 允许通过的最大电流; ζ 代表线路载流量安全裕度系数, 通常取 0.8。

(3) 节点电压偏差约束:

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (8)$$

(4) 分布式光伏电源建设容量约束:

$$S_{PV, i} \leq S_{C, i} \quad (9)$$

式中 $S_{C, i}$ 代表受地理、经济、政策等因素作用的节点 i 处允许建设的光伏电源最大容量。

(5) 供电半径约束。

对于如图 2 所示的无分支辐射馈线, 存在如下的变电站供电半径约束:

$$\sum_{k=1}^N l_k \leq l_{\max} \quad (10)$$

式中 $l_{\max}$ 为向该馈线供电的变电站的供电半径; l_k 为节点 k 至上游节点 $k-1$ 的线路长度, 与式(10)中的 R, X 关系如下:

$$R_k = r l_k \quad (11)$$

$$X_k = x l_k \quad (12)$$

式中 r, x 代表馈线单位长度的电阻、电抗值, 由导线型号决定; R_k, X_k 代表节点 k 至上游节点 $k-1$ 的线路电阻、电抗。

当辐射馈线存在分支时, 式(10)仍成立, 不过 N 需修改为单条主干-分支线的节点总数, 节点的选取应严格依照上游到下游选取。

供电半径约束是对馈线节点总数 N 的约束, 实际上是对灵活网架的约束。在不同运行方式下, 单个变电站供电的馈线长度不应超过其供电半径, 限制了诸如图 4 中运行方式的数量。

需要指出的是, 模型的决策变量为分布式光伏电源容量 $S_{PV, i}$, $S_{PV, i}$ 与 $P_{PV, i}$ 间的关系的见式(13), 状态变量如 U_i 等可由式(1)~式(3)确定或简化。

$$P_{PV, i} = \lambda S_{PV, i} \quad (13)$$

式中 λ 为光伏电站的最大效率, 代表满发时光伏电站出力与容量的比值。

3 模型的求解

本文构建的模型可用于求解给定网架接线下考虑灵活网架的分布式光伏电源准入容量问题。该模型以分布式光伏电源接入容量最大为目标, 适用于以尽可能接纳分布式光伏电源为主要目的的区域(“光伏扶

贫”区域等),可应用于指导分布式光伏电源的选址定容工作,也可作为评估特定区域不同网架结构对于接纳分布式光伏的适应性,从而为未来网架的发展模式提供建议等。

3.1 馈线上只有单个光伏电源接入

这种场景常用于分析不同网架结构、不同馈线型号、不同节点位置接纳分布式光伏的能力,探求分布式电源光伏准入容量的规律。该情况下,目标函数式(4)的 $M=1$,模型的求解相对简单,可采用结合二分法的枚举法求解,计算流程如图 3 所示。

图 3 中, d 为网架结构编号, D 为满足供电半径等

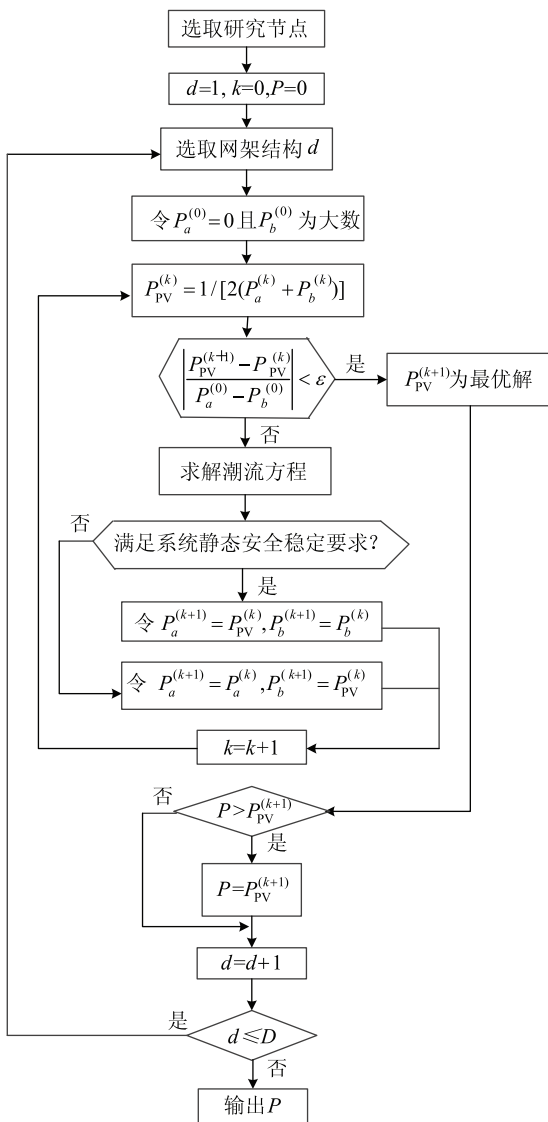


图 3 馈线上仅单个光伏电源接入时的准入容量计算流程

Fig. 3 Calculation process of penetration capacity with single PV access to the feeder

要求的网架结构总数;“大数” $P_b^{(0)}$ 为使系统静态安全稳定越限的某个值。

3.2 馈线上有多个光伏电源接入

这种场景更倾向于指导分布式光伏电源的选址定容工作。倘若仍采用结合二分法的枚举法求解,则模型将变为多层规划模型^[16],易陷入 NP-hard 问题求解的困境。因此,该场景下,采用混合智能遗传算法求解^[17]。整体计算流程如图 4 所示。

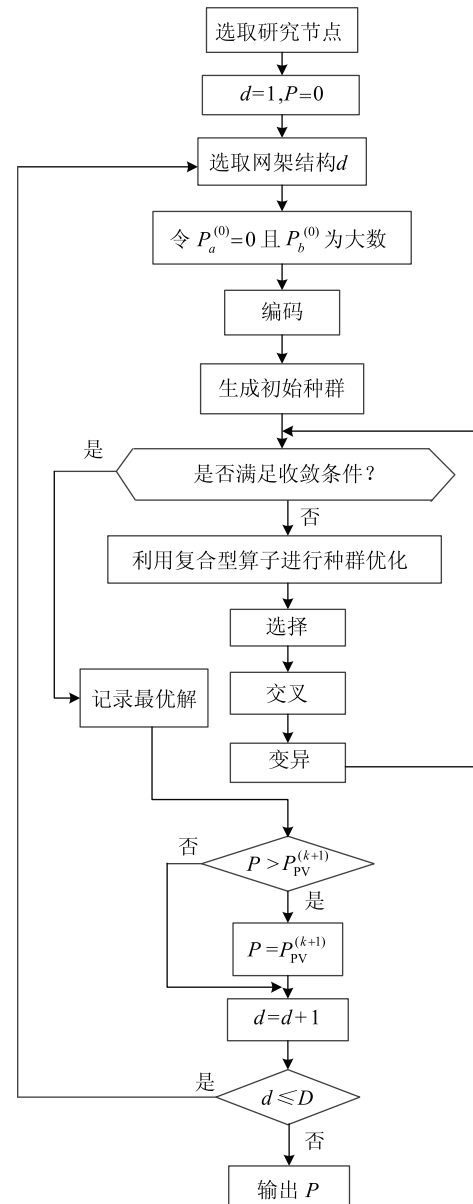


图 4 馈线上多个光伏电源接入时的准入容量计算流程

Fig. 4 Calculation process of penetration capacity with multiple PVs access to the feeder

图 4 中,混合智能遗传算法的收敛条件,此处定为

遗传代数达到规定的数据,可定为某个较大的数,例如1 000或10 000,输出光伏电源容量之和最大的某一代数据即可。

4 算例

利用分布式光伏电源准入容量求解模型,对10 kV中压配电网的几种典型网架接线进行最大可接入光伏电源容量的计算、分析、比较。场景及参数设置如下:基准功率为100 MV·A,基准电压为10 kV;将图1中的电源视作平衡节点;负荷节点的功率因数设为0.9;每个线路分段的导线型号相同、长度为2 km、每隔1 km设置一个负荷节点、每个节点负荷为0.25 MW;分段开关位于线路分段的首端,联络开关位于线路分段的末端;考虑到以接入光伏最大为主要目标的区域多位于人口密度较低的农村等区域,因此变电站的供电半径取为较大的12 km;导线型号取为LGJ-185;光伏电站效率 λ 取为0.9。

对于所研究、比较的网架接线,设定在正常运行方式下,馈线上分布式光伏电源单点接入。对于由开关状态构建的灵活网架下的各种运行方式,若某运行方式下馈线仅有一个节点接入光伏,则采用3.1节中的结合二分法的枚举法求解;若某运行方式下馈线有超过一个节点接入光伏,则采用3.2节中的混合智能遗传算法求解。

(1) 三分段单辐射接线。

三分段单辐射接线如图5所示。因没有其他馈线与其相连,线路上任何一个开关断开都将导致下游负荷断电。因此,三分段单辐射接线只有一种运行方式;同时,单辐射接线的运行方式也是单联络与双联络等网架接线的正常运行方式。其单点允许接入的光伏电源最大容量如图6所示。

图6即代表了不考虑灵活网架的情况下分布式光伏接入馈线不同位置的准入容量的变化规律。由图6可看出,制约分布式光伏接入的限制因素主要在于线路载流量与节点电压。当接入位置靠近系统母线侧时,主要受线路载流量约束;而接入位置远离系统母线靠近馈线末端时,节点电压较为敏感,主要受电压约束。且系统允许接入的分布式光伏电源容量随着接入位置远离系统母线而逐渐减小。

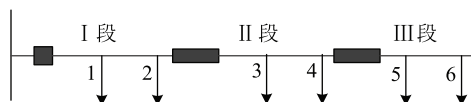


图5 三分段单辐射接线

Fig. 5 Radial connection mode with 3 sections

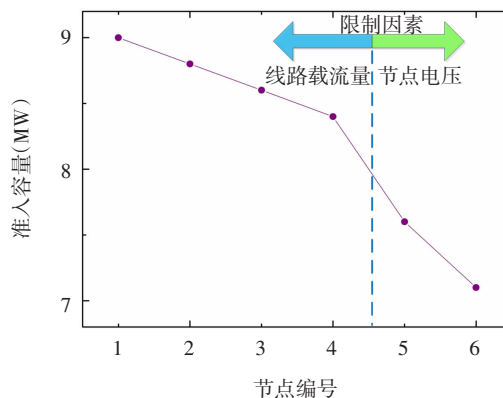


图6 三分段单辐射接线分布式光伏电源准入容量

Fig. 6 Penetration capacity of distributed photovoltaic in radial connection mode with 3 sections

(2) 三分段单联络接线。

三分段单联络接线如图7所示。正常运行方式下,联络开关断开,所连接的两条馈线完全对称。在供电半径内,保证负荷不失电的前提下,分段开关与联络开关的开断状态可以自由组合。因分布式光伏的接入容量应满足在各运行方式(网架结构)下均符合系统的静态安全稳定要求,因此,分布式光伏允许接入某节点的最大容量应取为各运行方式下的最小值。因结构对称,因此探究单条线路节点1-6的准入容量即可。其允许接入的光伏电源最大容量如图8所示。

由图8可以看出,当考虑灵活网架下的不同运行方式时,分布式光伏电源接入不同节点的准入容量变化规律大相径庭。一方面,比较这两种接线模式同一节点的准入容量,分布式光伏接入联络线路所允许接入容量要小许多;另一方面,比较同种接线模式接入不同节点的准入容量,单联络接线的分布式光伏准入容量随着接入位置远离系统母线而逐渐增大,与单辐射的变化规律相反。这是因为正常运行方式下接入馈线首端的分布式光伏电源,在其他运行方式下可能成为长线路末端节点,节点电压变化极为敏感,易出现过电压。

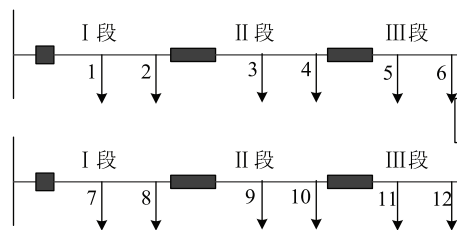


图7 三分段单联络接线

Fig. 7 Connection mode with 3 sections and single link

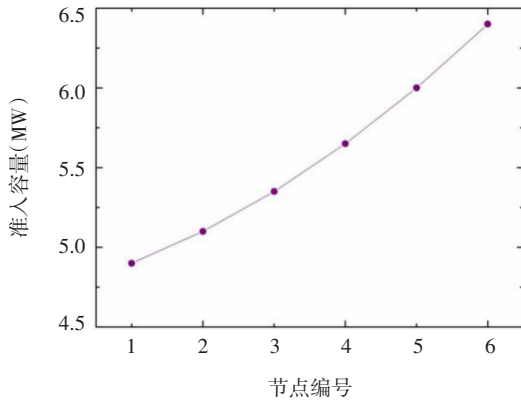


图 8 三分段单联络接线分布式光伏电源准入容量
Fig. 8 Penetration capacity of distributed photovoltaic in connection mode with 3 sections and single link

(3) 三分段双联络接线。

三分段双联络接线如图 9 所示。正常运行方式下,联络开关断开,三条馈线完全对称。探究在灵活网架下的不同运行方式下,分布式光伏电源接入线路节点 1-6 的准入容量,如图 10 所示。

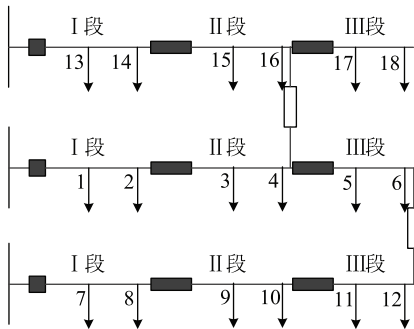


图 9 三分段双联络接线

Fig. 9 Connection mode with 3 sections and double links

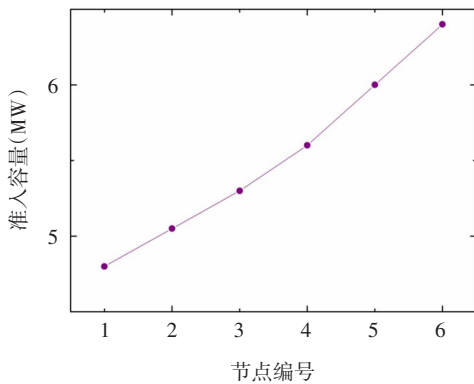


图 10 三分段双联络接线分布式光伏电源准入容量
Fig. 10 Penetration capacity of distributed photovoltaic in connection mode with 3 sections and double links

由图 10 可见,考虑灵活网架下的不同运行方式时,三分段双联络接线的准入容量量值及变化规律与三分段单联络接线相似。

(4) 综合比较分析。

将考虑灵活网架的三种网架接线的分布式光伏电源准入容量直观展示,如图 11 所示。

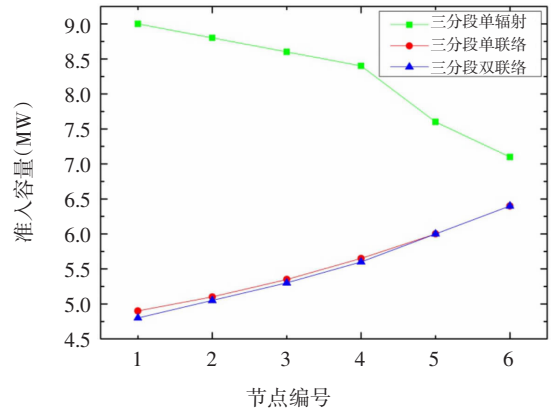


图 11 三种网架接线分布式光伏电源准入容量比较
Fig. 11 Comparison of distributed PV penetration capacity among three connection modes

可以看出,单一网架结构的单辐射线路允许接入分布式光伏的容量要显著高于考虑灵活网架的不同运行方式的联络结构线路。因此,对于“光伏扶贫”等以尽可能接纳分布式光伏为主要目的的区域,可暂时保留辐射状接线。待到该区域经济发展提高,用户数量增加、重要程度上升后,再考虑发展成为供电可靠性、转供能力更优的联络状网架接线。

5 结束语

(1) 本文提出了一种分布式光伏电源准入容量求解模型。该模型将主动配电网背景下的灵活网架纳入考虑范畴,以系统静态安全稳定为约束。通过将单个与多个分布式光伏电源接入的情况分开讨论,分别采用基于二分法的枚举法与混合智能遗传算法求解,保证了模型求解的效率;

(2) 利用该模型对 10 kV 中压配电网常见的三分段单辐射、单联络、双联络接线进行考虑灵活网架的分布式光伏准入容量计算、分析、比较,得出了以下结论: ①对于单一运行方式的辐射状结构而言,系统允许接入的分布式光伏电源容量随着接入位置远离系统母线而逐渐减小,且限制因素随着接入位置远离系统母线而逐渐由线路载流量转变为节点过电压约束; ②单联络与双联络允许接入的分布式光伏电源容量的量值与规律相似,且均显著小于单辐射接线的准入容量;

(3)与其他模型相比,本文所提模型对于特定区域的规划工作具有一定指导意义。通过算例的分析,提出以下建议:对于“光伏扶贫”等以最大化接入分布式光伏为主要目的的区域,建议先保留辐射状接线,综合统筹,延迟发展联络结构。

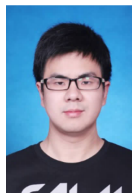
参考文献

- [1] 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.
- [2] Arne Faaborg POVL SEH. Impact of power penetration from photovoltaic power systems in distribution networks[R]. Fredericia, Denmark: IEA, 2002.
- [3] 钟清, 孙闻, 余南华, 等. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3050-3056.
Zhong Qing, Sun Wen, Yu Nanhua, et al. Load and Power Forecasting in Active Distribution Network Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3050-3056.
- [4] 卫志农, 陈胜, 孙国强, 等. 含多种类型分布式电源的主动配电网三相状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 68-74.
Wei Zhihong, Chen Sheng, Sun Guoqiang, et al. Distributed Three-phase State Estimation for Active Distribution Network Integrated with Different Types of Distributed Generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 68-74.
- [5] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(Sup. 1): 346-351.
- [6] 韩富佳, 王淳. 基于 Matlab 的分布式光伏并网发电系统对配电网电能质量的影响[J]. 电测与仪表, 2015, 52(14): 16-21.
Han Fujia, Wang Chun. Influences of the distributed photovoltaic grid-connected generation system on the distribution network power quality based on Matlab[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(14): 16-21.
- [7] 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(2): 145-151.
Zhang Yong. Review of Impact of Distributed Generation on Distribution System Protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 145-151.
- [8] 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.
- [9] 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.
Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, Liu Chun, et al. Influence of Distributed Photovoltaic Generation on Voltage in Distribution Network and Solution of Voltage Beyond Limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [10] 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 Shouzheng, Zhou Shuangxi, et al. Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [11] 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.
Chen Hu, Zhang Tian, Pei Huiming, et al. Analysis of distributed photovoltaic power influence on grid voltage and power losses[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 63-69.
- [12] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306.
Liu Jian, Huang Wei. Analysis on Grid-Connectable Capacity of Distributed PVG eneration in Case of PVG eneration Distribution Close to Load Distribution[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 299-306.
- [13] 黄炜, 刘健, 魏昊焜, 等. 分布式光伏电源极端可接入容量极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 22-28.
Huang Wei, Liu Jian, Wei Haokun, et al. Extreme capacity limitations of photovoltaic generators in distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 22-28.
- [14] 白晓清, 吴雪颖, 李佩杰, 等. 计及电压稳定裕度的配电网光伏发电选址与定容[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 34-41.
- [15] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 56-61.
Zhou Liangxue, Zhang Di, Li Canbing, et al. Access Capacity Analysis Considering Correlation of Distributed Photovoltaic Power and Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 56-61.
- [16] 夏成军, 崔弘, 王强, 等. 考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 96-100.
Xia Chengjun, Cui Hong, Wang Qiang, et al. Penetration Capacity Calculation for Distributed Generation Considering Static Security Constraints[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 96-100.
- [17] 叶萌, 刘文霞, 张鑫. 考虑电压质量的分布式电源选址定容[J]. 现代电力, 2010, 27(4): 30-34.

作者简介:



叶斌(1977—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向电网规划、设计、新能源。
Email: Yebin@sohu.com



朱泽安(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为电网规划、优化运行。Email: whu22a@163.com

马静(1979—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电网规划、设计。

代磊(1981—),男,本科,主要研究方向为电网规划、设计、新能源。

王承民(1970—),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统规划及经济运行、电力市场等。

候四维(1984—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化。

收稿日期:2018-03-03;修回日期:2018-06-29

(焦阳 编发)