

基于时序电压灵敏度的ADN分布式光伏选址及定容评估

王小仲¹,唐 明¹,林承钱¹,吴刚勇²,黄继华¹,郭 营³,陈丽娟³

(1. 国网浙江省电力有限公司 湖州供电公司,浙江 湖州 313000;2. 浙江泰仑电力集团有限责任公司,浙江 湖州 313000;3. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Distributed photovoltaic generation site selection and hosting capacity assessment for active distribution network based on time series voltage sensitivity

WANG Xiaozhong¹, TANG Ming¹, LIN Chengqian¹, WU Gangyong², HUANG Jihua¹, GUO Ying³, CHEN Lijuan³

(1. Huzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313000, China; 2. Zhejiang Tailun Power Group Co., Ltd., Huzhou 313000, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:随着分布式光伏的快速发展,如何确定主动配电网中分布式光伏的安装位置及最大准入容量成为促进新能源消纳良性发展的研究热点。由于分布式光伏的接入会对配电网电压产生很大影响,首先提出时序电压灵敏度指标,从电压角度得到分布式光伏的候选安装节点。其次,构建源荷不确定性时序场景集,建立计及不确定性的分布式光伏准入容量评估模型,并基于鲁棒线性化思想及对偶理论将模型转化为混合整数线性规划模型,以便模型的求解。通过 Matlab 搭建 IEEE 33 节点系统,仿真结果证明了所建模型的适应性及有效性。

关键词:主动配电网;分布式光伏发电;电压灵敏度;时序灵敏度;候选安装节点;准入容量;鲁棒线性化

Abstract: With the rapid development of distributed photovoltaics, how to determine the maximum access capacity of distributed photovoltaics in active distribution networks has become a research hotspot to promote the healthy development of renewable energy consumption. Firstly, since the access of distributed photovoltaics will have a great impact on the distribution network voltage, the time series voltage sensitivity index is proposed to obtain the candidate nodes of distributed PV. Secondly, source-load uncertainty time series scenario set is established. Based on this, a distributed photovoltaic access capacity evaluation model that takes into account uncertainty is constructed. At last, the optimization model is transformed to the mixed integer linear programming with the help of robust linearization and duality theory. The effectiveness of the proposed method is demonstrated using a modified IEEE 33-bus distribution system.

Key words: active distribution network; distributed photovoltaic generation; voltage sensitivity; time series sensitivity; candidate installation node; access capacity; robust linearization

0 引言

在全球能源危机和环境污染加剧的背景下,主动配电网(active distribution network, ADN)中光伏(photovoltaic, PV)渗透率迅速提高^[1-2]。然而,PV的高渗透率给主动配电网造成多方面的影响。光伏出力受光照强度的影响较大^[3-4],具有强烈的波动性与随机性。因此,科学准确地评估主动配电网PV的准入容量对促进新能源的消纳具有重要的现实意义。

目前,随机规划是用于解决不确定优化问题的常用方法。文献[5]考虑风光荷的季节特性与互补性,构建基于随机规划的接纳能力评估数学模型。

文献[6]利用基于机会约束的随机规划评估配电网分布式电源(distributed generation, DG)并网容量。随机规划方法虽然在一定程度上取得了相应的研究成果,但也存在局限性:其往往计算规模较大,且在实际中很难获得较为准确的概率分布,获得的决策结果可能与实际偏离程度较大;鲁棒优化(robust optimization, RO)是研究不确定优化问题的一种新的建模方法。该方法仅通过不确定性变量的边界参数来表征不确定性,应用范围更广,更符合工程实际情况。文献[7]与文献[8]利用RO思想来确定配电网中DG在约定位置的最大接入容量。但这种鲁棒优化保证最坏情况下约束条件可行,过于保守。

综上所述,DG的最大准入容量已广泛引起学者的重视,但目前研究仍然存在一定问题。

在系统安全性和最大准入容量之间的矛盾处

收稿日期:2021-07-03;修回日期:2021-09-04

基金项目:国网浙江省电力有限公司集体企业科技项目(2018-HZJTKJ-02);国家自然科学基金资助项目(51877044)

理上,如何更好地考虑不确定性又不会过于保守的估计极端状态是模型构建的重难点。本文正是在上述背景下提出了基于时序电压灵敏度的ADN分布式光伏选址及定容评估方法。首先,运用时序电压灵敏度建立指标,得到PV的候选安装节点。其次,考虑PV出力和负荷需求的随机性与时序性,同时考虑主动网络管理措施(active network management, ANM),包括有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)、静止无功补偿器(static var compensator, SVC),构建ADN分布式光伏最大准入容量评估数学模型,借助鲁棒性指标平衡主动配电网的安全可靠性和解的最优性。

1 分布式光伏候选节点选取

以PV为代表的分布式电源的接入位置直接影响主动配电网的电压分布。电力系统电压灵敏度指标是用来评估当节点注入功率发生变化时,引起系统中各节点的电压变化程度的指标,其物理意义明确,计算量较小,广泛应用于电力系统稳定性分析、无功补偿等研究领域。因此,本节讨论电压灵敏度方法来分析确定PV的接入位置。

1.1 电压灵敏度矩阵

对于 N 节点配电网,根据牛顿拉夫逊潮流计算^[11],将节点功率方程进行泰勒展开并略去高阶项

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \\ \Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: i, j 分别为节点编号; ΔU_j 、 $\Delta \theta_j$ 分别为节点的电压、相角变化量; ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点注入有功和无功变化量。

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:矩阵 $J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix}$ 为雅各比矩阵; $J_{P\theta}$ 、 J_{PU} 、 $J_{Q\theta}$ 和 J_{QU} 分别为 ΔP 、 ΔQ 对 θ 、 U 的偏微分矩阵; ΔP 、 ΔQ 分别为节点有功和无功功率变化增量的列向量; $\Delta \theta$ 和 ΔU 分别为电压相角和幅值变化增量的列向量。

令 $\Delta Q=0$,可得节点电压-有功功率关系

$$\Delta U = (J_{PU} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QU})^{-1} \Delta P = \lambda \Delta P \quad (3)$$

$$\lambda = (J_{PU} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QU})^{-1} \quad (4)$$

式中:矩阵 λ 为节点电压-有功灵敏度矩阵。

令 $\Delta P=0$

$$\Delta U = (J_{QU} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PU})^{-1} \Delta Q = \mu \Delta Q \quad (5)$$

$$\mu = (J_{QU} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PU})^{-1} \quad (6)$$

式中:矩阵 μ 为节点电压-无功灵敏度矩阵。

灵敏度矩阵中第 i 行中的各元素代表各节点注入功率改变 ΔP 或 ΔQ 后,节点 i 的电压变化情况,而第 i 列的各元素代表节点 i 注入功率变化时对其余各节点电压的影响程度。

1.2 时序节点灵敏度指标

PV的接入会造成节点电压抬升,电压偏移程度是作为构建灵敏度指标的一项因素,针对不同节点,灵敏度值的需求也不相同,因此指导分布式光伏接入位置的节点 i 的静态节点电压-有功灵敏度指标为

$$s_i = \sum_{j \in L} \lambda_{ji} (U_{\text{ref}} - U_j) - \sum_{j \in M} \lambda_{ji} (U_j - U_{\text{ref}}) \quad (7)$$

式中: λ_{ji} 为节点 i 注入功率变化时, i 节点对 j 节点的节点电压-有功灵敏度; L 为电压低于基准电压的节点集合; M 为电压高于基准电压的节点集合; U_{ref} 为基准电压。

同理,可得静态节点电压-无功灵敏度指标

$$z_i = \sum_{j \in L} \mu_{ji} (U_{\text{ref}} - U_j) - \sum_{j \in M} \mu_{ji} (U_j - U_{\text{ref}}) \quad (8)$$

式中: μ_{ji} 为节点 i 注入功率变化时, i 节点对 j 节点的节点电压-无功灵敏度。

式(7)、式(8)只是针对单一时间断面进行计算,指标的优劣完全依赖于给定的运行状态。为了确保整个运行周期内PV接入的最优性,需要考虑主动配电网中元素的时序变化。因此,提出时序节点灵敏度指标用于计及各时段系统不同的状态,进而选取PV的接入位置。其计算模型如式(9)、式(10)所示

$$\begin{cases} S_i = \sum_{t=1}^T s_{i,t} \times \omega_t \\ Z_i = \sum_{t=1}^T z_{i,t} \times \omega_t \\ \omega_t = c_{pv,t} (N_{\text{exc},t} + 1) \times \max\{0, \max_{j \in N} (U_{\text{ref},t} - U_{j,t})\} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} K_i = S_i + Z_i \\ \text{Node} = \arg \max_{i \in N} \{K_i\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_i 、 Z_i 分别为节点 i 时序节点电压-有功和节点电压-无功灵敏度指标; $s_{i,t}$ 、 $z_{i,t}$ 分别为节点 i 静态节点电压-有功和节点电压-无功灵敏度指标; ω_t 为 t 时段的权重因子; $c_{pv,t}$ 为当前时刻光伏发电对电网的影响程度; $\max(U_{\text{ref},t} - U_{j,t})$ 为 t 时段内节点电压向下最大偏移程度; $N_{\text{exc},t}$ 为 t 时段内系统电压越下限节点个数; K_i 为时序节点电压灵敏度指标; Node 为分布式光伏接入节点。

2 源荷不确定性时序场景分析

基于历史统计数据预测出PV出力及负荷需求的均值和波动区间,在计及源荷不确定性的同时考虑其时序性,构建PV出力及负荷需求的鲁棒区间时序场景集

$$\Psi(\xi_t) = \begin{cases} \gamma_t, p_t^l \gamma_{j,t} \in [\bar{\gamma}_{j,t} - \tau_{j,t} \hat{\gamma}_{j,t}, \bar{\gamma}_{j,t} + \tau_{j,t} \hat{\gamma}_{j,t}] & \forall j \in D \\ p_{j,t}^l \in [\bar{p}_{j,t}^l - s_{j,t} \hat{p}_{j,t}^l, \bar{p}_{j,t}^l + s_{j,t} \hat{p}_{j,t}^l] & \forall j \in N \\ 0 \leq \tau_{j,t} \leq 1 \\ 0 \leq s_{j,t} \leq 1 \\ \sum_{j \in D} \tau_{j,t} + \sum_{j \in N} s_{j,t} \leq \xi_t \end{cases} \quad (11)$$

式中: γ_t 、 p_t^l 分别为 t 时段PV容量系数向量和负荷有功向量; $\gamma_{j,t}$ 、 $p_{j,t}^l$ 分别为 t 时段 j 节点的PV容量系数和负荷有功出力,为不确定变量; $\bar{\gamma}_{j,t}$ 、 $\bar{p}_{j,t}^l$ 分别为PV容量系数和负荷的均值; $\hat{\gamma}_{j,t}$ 、 $\hat{p}_{j,t}^l$ 分别为PV容量系数和负荷的波动上限; D 为PV候选安装节点集合; $\tau_{j,t}$ 、 $s_{j,t}$ 分别为引入的0-1辅助变量; ξ_t 为鲁棒性指标。

3 分布式光伏准入容量评估数学模型

3.1 目标函数

以PV候选安装节点的安装容量之和最大为目标,构建PV准入容量评估数学模型为

$$\max f = \sum_{i \in D} P_i^{\text{PV}} \quad (12)$$

式中: P_i^{PV} 为候选安装节点 i 的PV安装容量。

3.2 约束条件

(1) 配电网潮流约束

为便于模型的求解,以首节点电压和各节点有功、无功注入功率表示支路潮流和节点电压,典型辐射式配电网中潮流等式约束进行线性化转换,其具体形式为

$$\begin{cases} P_{i,t} = \sum_{j \in N} H_{ij} p_{j,t} \\ Q_{i,t} = \sum_{j \in N} H_{ij} q_{j,t} \\ U_{i,t} = U_0 - \frac{\sum_{j \in N} (p_{j,t} R_{ij} + q_{j,t} X_{ij})}{U_D} \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_0 为首节点的电压; U_D 为OLTC二次侧电压值; R_{ij} 和 X_{ij} 分别为首节点至节点 i 与首节点至节点 j 的两条支路重叠部分的电阻和电抗。

定义矩阵 M 表示配电网的拓扑矩阵,它具有明确的物理意义:若节点 j 位于首节点至节点 i 的线路上,则 $M_{ij} = 1$;反之, $M_{ij} = 0$ 。约束条件为

$$\begin{cases} H = M^T \\ p_{j,t} = p_{j,t}^l - p_{j,t}^{\text{PV}} \\ q_{j,t} = q_{j,t}^l - q_{j,t}^{\text{PV}} - q_{j,t}^{\text{svc}} \\ p_{j,t}^{\text{PV}} = \gamma_{j,t} P_j^{\text{PV}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $p_{j,t}^l$ 、 $q_{j,t}^l$ 分别为 t 时段节点 j 的有功、无功负荷; $p_{j,t}^{\text{PV}}$ 、 $q_{j,t}^{\text{PV}}$ 分别为 t 时段节点 j 处PV输出的有功功率、无功功率; $q_{j,t}^{\text{svc}}$ 为在 t 时段节点 i 处的SVC的无功补偿。

(2) 主动网络管理措施相关约束

本文考虑的主动网络管理主要包括有载调压变压器^[13]及静止无功补偿器^[11-12],其运行约束可表示为式(15)、式(16)所示

$$k_{\min} \leq k_t \leq k_{\max} \quad (15)$$

式中: $k_{\min}$ 和 $k_{\max}$ 分别为OLTC的可调变比上、下限。

$$q_j^{\text{svc}, \min} \leq q_{j,t}^{\text{svc}} \leq q_j^{\text{svc}, \max} \quad \forall j \in C \quad (16)$$

式中: $q_j^{\text{svc}, \min}$ 和 $q_j^{\text{svc}, \max}$ 分别为SVC补偿功率的下限和上限; C 为SVC的安装节点。

(3) 设备容量约束

设备容量约束包括变压器容量约束及线路容量约束,是二次不等式。具体形式为

$$p_t^2 + q_t^2 \leq S_{\max}^2 \quad (17)$$

在保证求解精度的同时为提升模型求解效率,将设备容量约束线性转化^[7]为式(18)、式(19)所示

$$a_n p_{\text{sub},t} + b_n q_{\text{sub},t} \leq \kappa_n S_{\text{sub},\max} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (18)$$

$$a_n p_{l,t} + b_n q_{l,t} \leq \kappa_n S_{l,\max} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (19)$$

式中: $p_{\text{sub},t}$ 、 $q_{\text{sub},t}$ 分别为 t 时段变压器发出的有功功率和无功功率; $p_{l,t}$ 、 $q_{l,t}$ 分别为 t 时段线路传输的有功功率和无功功率; $S_{\text{sub},\max}$ 、 $S_{l,\max}$ 分别为变压器容量和线路容量; a_n 、 b_n 和 κ_n 分别为线性不等式的系数; K 为设备容量约束可行域采用正 K 边形区域线性化。

节点电压上、下限约束及变压器有功功率和无功功率上、下限约束采用常见的表达式^[13],此处不再赘述。

3.3 含不确定参数约束条件的鲁棒线性化

根据鲁棒线性优化理论及对偶理论^[9],对存在不确定性参数的约束条件进行转化,以简化模型求解。在前期的研究^[13]中,对转化过程进行了详细的分析与研究,因此以节点电压上限约束为例,对转化过程进行分析

将式(13)带入节点电压上限约束可得

$$U_{\text{sub}}^2 (1 + k \cdot \vartheta) + \sum_{j \in D} \gamma_{j,t} p_j^{\text{PV}} (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}}) + \sum_{j \in C} q_{j,t}^{\text{svc}} X_{ij} - \sum_{j \in N} p_{j,t}^l (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^l) \leq U_{i,\max} U_{\text{sub}} \quad (20)$$

根据鲁棒优化的基本概念,节点电压上限约束可以转化为

$$\begin{aligned}
 & U_{\text{sub}}^2(1+k \cdot \vartheta) + \sum_{j \in D} \bar{\gamma}_{j,t} p_j^{\text{PV}} (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}}) + \\
 & \sum_{j \in C} q_{j,t}^{\text{SVC}} X_{ij} - \sum_{j \in N} \bar{p}_{j,t}^1 (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L) + \sum_{j \in D} \tau_{j,t} + \\
 & \sum_{j \in N} s_{j,t} + \max \left\{ \sum_{j \in D} \tau_{j,t} \hat{\gamma}_{j,t} \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}} \right| p_j^{\text{PV}} + \right. \\
 & \left. \sum_{j \in N} s_{j,t} \hat{p}_{j,t}^1 \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L \right| \right\} \leq U_{i,\max} U_{\text{sub}}
 \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)是一个含max函数的不可解析的不等式约束,下面对式(21)中的max函数进行转化

$$\begin{aligned}
 & \max \left\{ \sum_{j \in D} \tau_{j,t} \hat{\gamma}_{j,t} \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}} \right| p_j^{\text{PV}} + \right. \\
 & \left. \sum_{j \in N} s_{j,t} \hat{p}_{j,t}^1 \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L \right| \right\}
 \end{aligned} \quad (22)$$

s. t.

$$0 \leq \tau_{j,t} \leq 1 \quad (23)$$

$$0 \leq s_{j,t} \leq 1 \quad (24)$$

$$\sum_{j \in D} \tau_{j,t} + \sum_{j \in N} s_{j,t} \leq \xi_t \quad (25)$$

根据对偶理论,上式可以转化为

$$\min \left\{ \xi_{t,i} z_{ub,t,i} + \sum_{j \in D} h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} + \sum_{j \in N} h_{ub,t,ij}^L \right\} \quad (26)$$

s. t.

$$z_{ub,t,i} + h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} \geq \hat{\gamma}_{j,t} \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}} \right| p_j^{\text{PV}} \quad (27)$$

$$z_{ub,t,i} + h_{ub,t,ij}^L \geq \hat{p}_{j,t}^1 \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L \right| \quad (28)$$

$$h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} \geq 0 \quad (29)$$

$$h_{ub,t,ij}^L \geq 0 \quad (30)$$

$$z_{ub,t,i} \geq 0 \quad (31)$$

式中: $h_{ub,t,ij}^{\text{PV}}$ 、 $h_{ub,t,ij}^L$ 和 $z_{ub,t,i}$ 分别为对偶变量。

将式(26)带入式(21),则节点电压上限约束可以转化为如下形式

$$\begin{aligned}
 & U_{\text{sub}}^2(1+k \cdot \vartheta) + \sum_{j \in D} \bar{\gamma}_{j,t} p_j^{\text{PV}} (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}}) + \\
 & \sum_{j \in C} q_{j,t}^{\text{SVC}} X_{ij} - \sum_{j \in N} \bar{p}_{j,t}^1 (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L) + \sum_{j \in D} \tau_{j,t} + \\
 & \sum_{j \in N} s_{j,t} + \min \left\{ \xi_{t,i} z_{ub,t,i} + \sum_{j \in D} h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} + \sum_{j \in N} h_{ub,t,ij}^L \right\} \\
 & \leq U_{i,\max} U_{\text{sub}}
 \end{aligned} \quad (32)$$

由文献[14]可知,由目标函数和式(32)组成的优化问题可以转化为线性模型

$$\max \sum_{j \in D} P_j^{\text{PV}} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 & U_{\text{sub}}^2(1+k \cdot \vartheta) + \sum_{j \in D} \bar{\gamma}_{j,t} p_j^{\text{PV}} (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}}) + \\
 & \sum_{j \in C} q_{j,t}^{\text{SVC}} X_{ij} - \sum_{j \in N} \bar{p}_{j,t}^1 (R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L) + \sum_{j \in D} \tau_{j,t} + \\
 & \sum_{j \in N} s_{j,t} + \xi_{t,i} z_{ub,t,i} + \sum_{j \in D} h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} + \sum_{j \in N} h_{ub,t,ij}^L \leq U_{i,\max} U_{\text{sub}}
 \end{aligned} \quad (34)$$

s. t.

$$z_{ub,t,i} + h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} \geq \hat{\gamma}_{j,t} \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^{\text{PV}} \right| p_j^{\text{PV}} \quad (35)$$

$$z_{ub,t,i} + h_{ub,t,ij}^L \geq \hat{p}_{j,t}^1 \left| R_{ij} + X_{ij} \tan \varphi_j^L \right| \quad (36)$$

$$h_{ub,t,ij}^{\text{PV}} \geq 0 \quad (37)$$

$$h_{ub,t,ij}^L \geq 0 \quad (38)$$

$$z_{ub,t,i} \geq 0 \quad (39)$$

式中: U_{sub} 为有载变压器二次侧电压; k 为OLTC分接头的位置; ϑ 为OLTC分接头的步长; $\tan \varphi_j^{\text{PV}}$ 、 $\tan \varphi_j^L$ 分别为PV及负荷相关的功率因数角的正切值; $h_{ub,t,ij}^{\text{PV}}$ 、 $h_{ub,t,ij}^L$ 和 $z_{ub,t,i}$ 分别为对偶变量,是引入的辅助变量。

至此,准入容量评估数学模型转化成混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)型。基于时序电压灵敏度的ADN分布式光伏选址及定容评估方法的整体流程如图1所示。

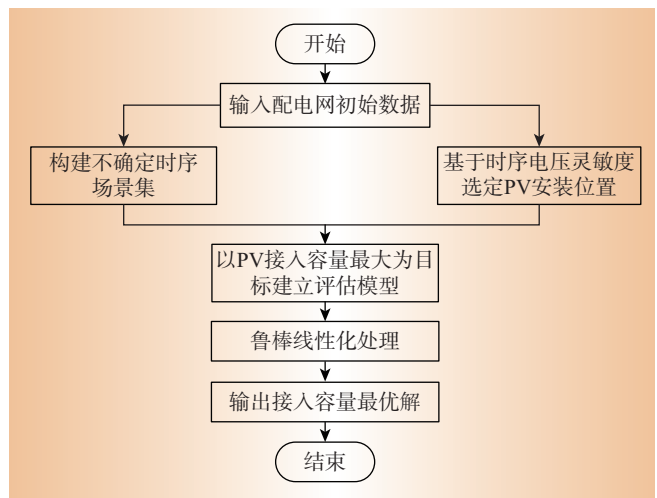


图1 PV选址及定容评估方法流程

Fig. 1 Process of PV site selection and hosting capacity evaluation method

4 算例分析

4.1 算例描述

本文采用改进的IEEE33节点系统对提出的基于时序电压灵敏度的ADN分布式光伏选址及定容评估方法进行测试,测试系统如图2所示,其中节点0为平衡节点。SVC安装在17、32节点。

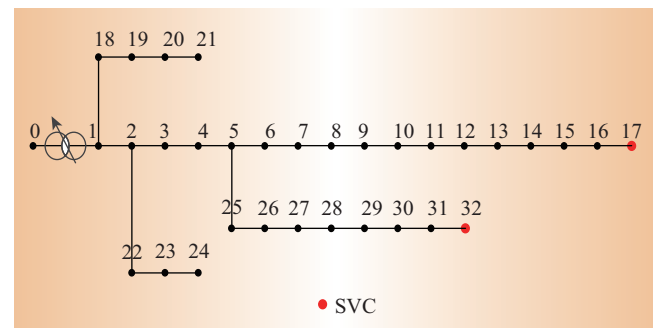


图2 改进的IEEE 33节点配电系统

Fig. 2 Modified IEEE 33-bus distribution network

OLTC 容量设置为 6 MVA,OLTC 分接头具有 17 个档位,保证电压能够从 0.95 至 1.05 变化;变压器最大传输有功功率、无功功率分别设置为 6 MW 和 3 Mvar;SVC 设置为能够从 -100 kvar 至 300 kvar 进行连续变化;PV 的功率因数设置为 0.98。一天 24 h 的 PV 的出力及日负荷需求曲线如图 3 所示。

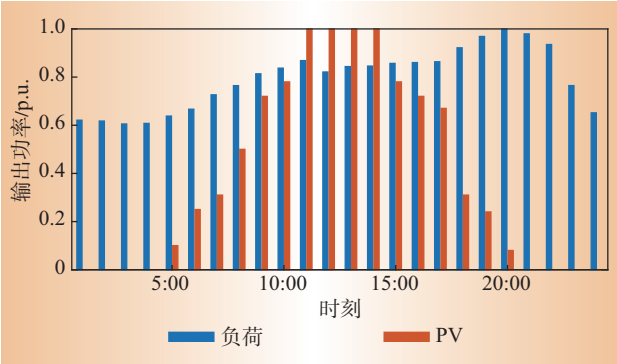


图3 PV 出力及负荷需求曲线
Fig. 3 PV output and load demand curves

4.2 仿真分析

4.2.1 分布式光伏选址

利用本文所提出的时序灵敏度计算方法对一天 24 h 分析计算。得到所有节点的时序灵敏度指标,计算结果如图 4 所示。

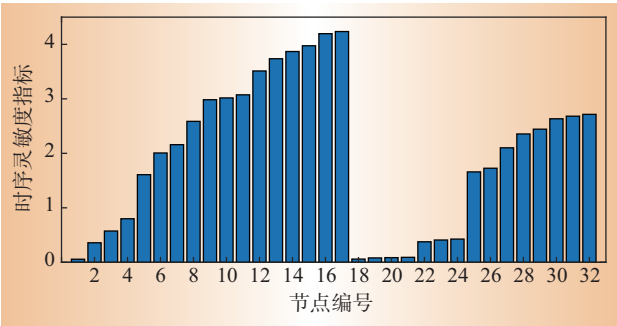


图4 时序灵敏度计算结果
Fig. 4 Timing sensitivity result

由图 4 可知,PV 的最优接入节点为 17 节点。按照本文所述接入容量计算流程得到 17 节点的最大接入容量后,再次计算时序灵敏度指标,计算结果如图 5 所示。

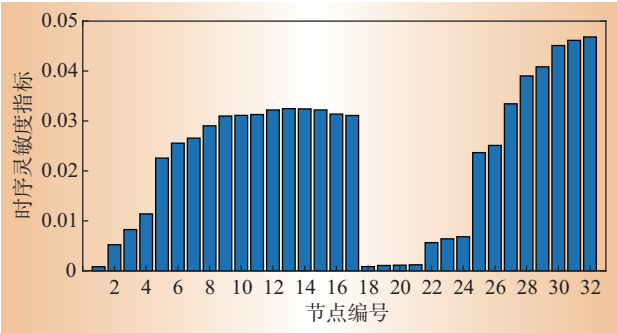


图5 第 2 时序灵敏度计算结果
Fig. 5 Second timing sensitivity result

以此类推,依据各次时序电压灵敏度的计算结果,选定 5 个候选节点,分别为 17、32、13、29、24,选址结果如图 6 所示。5 个候选节点分散在线路的中端与末端,能够很好的改善 IEEE 33 节点电压不合格的现象。

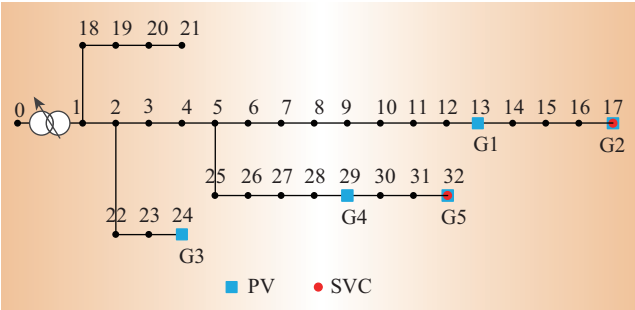


图6 选址结果
Fig. 6 Sit selection result

4.2.2 分布式光伏接入容量分析

由选址结果可知,本算例的不确定功率注入总数为 37,共包括 32 个负荷节点和 5 个 PV 接入节点,则鲁棒性指标的取值范围是 [0, 37]。为了验证本文提出的基于 RO 思想准入容量评估数学模型的适应性及可行性,需要评估在最保守条件下,配电网 PV 的最大接入容量。因此,鲁棒性指标取值设定为 37,考虑 6 种不同场景下分布式光伏的总接入容量及各候选安装节点 PV 的具体接入容量,如表 1 所示。

表1 分布式光伏接入容量
Table 1 Distributed photovoltaic access capacity
MW

序号	方案	G1	G2	G3	G4	G5	总接入容量
1	原方案	0.801	0	2.787	1.598	0	5.186
2	不考虑无功补偿	0.685	0.100	1.969	1.248	0.191	4.192
3	不考虑变压器	0.844	0.008	2.494	1.509	0.088	4.943
4	增加变压器步长	0.847	0	2.507	1.510	0.088	4.952
5	增加无功补偿	0.830	0	2.795	1.590	0	5.215
6	禁止向上级电网倒送	0.165	0.296	0.428	0.756	0.186	1.830

从表 1 中数据可以看出,方案 2 和方案 3 都比原方案的接入容量小,因此,以有载调压变压器以及无功补偿设备为代表的 ADN 主动管理措施可以有效提升分布式电源的接入能力。对比方案 1 和方案 4 可知,有载调压变压器分接头的步长大小会影响分布式光伏的接入容量,这是因为步长越小,对首节点的电压调节就会越灵活,从而影响 DG 接入水平。对比方案 1 和方案 5 可知,适当的增加无功补偿容量也可

以增加DG接入容量。这体现了在评估PV接入容量的过程中,考虑主动管理措施的必要性,会使得评估结果更加准确,符合实际电网的发展情况。此外,对比方案1和方案6可知,当不允许向上级电网倒送时,分布式光伏的接入总容量将急速减少。

5 结束语

本文对分布式光伏的选址以及定容问题进行研究,引入时序灵敏度方法确定PV的最佳并网点,并提出一种基于RO思想的方法对PV的最大准入容量进行评估。主要结果如下:

(1) 利用时序灵敏度方法解决PV选址问题,并在改进IEEE 33算例中得到了验证;

(2) 为了适应新型配电网,在评估模型构建中考虑了主动管理措施,验证了主动配电网中的OLTC和SVC对PV准入容量的影响是较大的;

(3) 通过算例分析验证了可调节鲁棒优化思想可以较好的平衡电网安全性和PV准入容量之间的矛盾。在未来的研究中,基于配电网的准入容量评估结果,辨识限制PV接入容量的薄弱环节,对提升配电系统准入容量,促进新能源消纳具有重要意义。D

参考文献:

- [1] 赫卫国,程军照,王文玺,等. 含分布式光伏发电的配电网电压越界调节策略[J]. 电力需求侧管理,2017,19(6):19-24.
HE Weiguo, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Strategies for voltage regulation of distribution networks with distributed photovoltaic power generation [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 19-24.
- [2] 蒋子维,吴峰. 主动配电网低压分布式光伏连锁故障分析[J]. 供用电,2021,38(4):77-84.
JIANG Ziwei, WU Feng. Analysis of low voltage distributed photovoltaic cascading failure in active distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 77-84.
- [3] 王强,顾乔根,孙仲民,等. 计及出力波动的光伏电站无功支撑能力评估[J]. 电力工程技术,2020,39(2):29-34.
WANG Qiang, GU Qiaogen, SUN Zhongmin, et al. The evaluation of reactive power support capacity of photovoltaic power station considering output fluctuation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(2): 29-34.
- [4] 叶林,裴铭,路朋,等. 基于天气分型的短期光伏功率组合预测方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(1):44-54.
YE Lin, PEI Ming, LU Peng, et al. Low-voltage grid line loss algorithm based on actual line structure and considering dynamic three-phase unbalance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 44-54.
- [5] 张倩. 基于随机规划的风光互补系统接纳能力研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
ZHANG Qian. Research on the acceptance of wind-solar complementary system based on stochastic programming [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [6] ZIO E, DELFANTI M, GIORGI L, et al. Monte carlo simulation-based probabilistic assessment of DG penetration in medium voltage distribution networks [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 852-860.
- [7] 吴素农,于金镒,杨为群,等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术,2018,42(11):3 691-3 697.
WU Sunong, YU Jinyi, YANG Wei-qun, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC [J]. IEEE Trans in Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1 111-1 123.
- [8] CHEN X, WU W C, ZHANG B M. Data-driven DG capacity assessment method for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3 946-3 957.
- [9] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust optimization of uncertain linear programs [J]. Operations Research Letters, 1999, 25(1): 1-13.
- [10] 王淇,刘继春,杨阳方. 考虑主动管理措施的增量配电网网架规划[J]. 电测与仪表,2019,56(22):37-43.
WANG Qi, LIU Jichun, YANG Yangfang. Incremental distribution network grid planning considering active management measures [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 37-43.
- [11] 袁爽,戴朝华,赵传,等. 多异质能源接入下的无功电压局部全局融合优化[J]. 中国电机工程学报,2018,38(4):1 006-1 015.
YUAN Shuang, DAI Chaohua, ZHAO Chuan, et al. Local collaborative optimization of reactive power voltage with multiple heterogeneous energy sources integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1 006-1 015.
- [12] FLORIN C, LUIS F, OCHOA, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 346-356.
- [13] 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.
GAN Wen, XU Qing, SHEN Chengliang, et al. Research on distributed photovoltaic admittance capacity in distribution network based on robust optimization [J]. Applied Science and Technology, 2019, 46(6): 53-62.
- [14] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data [J]. Mathematical Programming, 2000, 88(3): 411-424.

(责任编辑 张紫涛)