

低压配电网分布式光伏接纳能力分析

赵冬梅¹, 任耀宇¹, 程雪婷²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206;
2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西省太原市 030001)

Analysis of Distributed Photovoltaic Acceptance Capacity in Low Voltage Distribution Network

ZHAO Dongmei¹, REN Yaoyu¹, CHENG Xueting²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China)

摘要：分布式光伏的并网和利用是应对当前能源和环境危机的重要方式，高比例分布式光伏接入所导致的电压越限是制约配电网接纳分布式光伏的重要因素之一。以提高配电网对分布式光伏的接纳量为首要目标，考虑多电压等级配电网的配合，提出利用中压主动配电网的调控能力，通过中低压配电网的相互影响缓解低压配电网调压手段缺乏，提升低压配电网接纳分布式光伏能力的方法：首先考虑配电网中分布式光伏和负荷出力的时序性，根据季节和天气构建12种场景，对配电网进行一年的时序全过程模拟。然后建立10 kV中压主动配电网优化运行模型和380 V辐射型低压配电网分布式光伏选址定容模型。仿真结果表明所提方法可以提高低压配电网接纳分布式光伏的能力。除此之外，进一步分析了分布式光伏接入和调压对中压主动配电网电压的影响，以及低压配电网中负荷对接纳分布式光伏和调压方式的影响。

关键词：低压配电网；接纳能力；主动配电网；分布式光伏；多电压等级

Abstract: Grid-connection and utilization of distributed photovoltaic (abbr. PV) power are important ways to cope with present risks in energy source and environment, and the voltage out-of-limit caused by grid-connection of high-proportioned distributed PV power is one of the important factors restricting the ability of distribution network to accept distributed PV power. Taking enhancing the ability of distribution network to accept distributed PV power as the primary objective and considering the coordination among multi-voltage levels in distribution network, a method was proposed, which utilized the regulation and control ability of medium-voltage active distribution network and alleviated the absence of voltage regulation means via the mutual influence between medium-voltage and low-voltage distribution networks and promoted the ability of

low-voltage distribution network to accept the distributed PV power. Firstly, considering time-sequence of the output of distributed PV power and load in distribution network and according to the season and weather, twelve scenarios were constructed to carry out time-sequence overall process simulation of a whole year. Secondly, an optimized operation model of 10 kV medium-voltage active distribution network and a site selecting and capacity determining model for distributed PV power in 380 V radial low-voltage distribution network were established. Simulation results show that using the proposed method the ability of low-voltage distribution network to accept distributed PV power can be enhance. Besides, the influence of grid-connection and voltage regulation of distributed PV power on the voltage of medium-voltage active distribution network and the influence of the load in low-voltage distribution network on accepting distributed PV power and voltage regulation modes are further analyzed.

Keywords: low voltage distribution network; acceptance capacity; active distribution network; distributed PV power; multi-voltage level

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0402

0 引言

在环境污染日趋严重和传统能源日渐短缺的背景下，以光伏发电为代表的可再生清洁能源已经受到广泛的关注且大规模并入电网。国家能源局发布的《可再生能源“十三五”发展规划》中提到，到2030年我国要实现非化石能源占一次能源消费比重20%的目标^[1]。光伏发电在众多可再生能源中占有十分重要的位置，目前光伏装机

容量呈现快速增长的趋势^[2]。根据容量不同，光伏发电分为两种并网形式：一是通过中高压线路接入输电网，二是通过低压线路接入配电网^[3]。根据《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》及《电力发展“十三五”规划》，光伏并网发电应当遵循分散开发、就近消纳为主的原则。光伏分散式并网及电能的就地消纳已经成为趋势^[4]。因此，在低压配电网中分布式光伏并网数量会迅速增长，容量也不断增加。

传统的配电网是一种基于电网供电与用户用电之间的单向电力分配网路，电压呈现从首端到末端降低的趋势，随着分布式光伏接入负荷侧，潮流分布发生改变，当分布式光伏的容量超过负荷时，原有的负荷侧就会变成电源侧，形成潮流倒送，潮流倒送导致原有电压降低的节点变成电压升高的节点，接入容量过大时会发生电压越上限的现象。在高比例分布式光伏并网所面临的诸多风险中，电压越限是影响光伏消纳最重要的因素之一^[5]，在进行配电网分布式光伏接纳能力分析时，要充分考虑电压越限的风险。文献[6]研究了配电网中分布式电源的最大接入容量，采用遗传算法和牛顿-拉夫逊法求解模型；文献[7]通过控制分布式电源逆变器应对电压越限，提升分布式电源的接入容量；文献[8]利用智能软开关进行双向功率调节，提升配电网中分布式电源的接入容量；文献[9-10]分析了功率因数控制和有功削减等对分布式电源准入容量的影响；文献[11]分析配电网静态和动态重构对配电网接纳分布式电源的作用。相关研究表明采取适当的调压措施可以缓解分布式电源接入导致的电压越限问题，提高配电网对分布式电源的接纳能力。

低压配电网受投资经济性的限制，通信网薄弱、量测不全^[12]，缺少可控资源，缺乏调压手段，而现阶段不可控的分布式电源和可控资源如微型燃气轮机、储能设备、联络开关及可控负荷等的大量接入，使中压配电网形成具有一定协调控制能力的主动配电网（active distribution network, ADN）^[13]。现有关于配电网接纳分布式电源的研究都是针对单一电压等级的配电网，未考虑多电压等级配电网之间的相互影响。本文进行低压配电网分布式光伏接纳能力分析时，考虑多电压等级配电网的配合，提出利用中压主动配电网的调控能力，通过中低压配电网的相互影响缓解低压

配电网调压手段缺乏，提升低压配电网接纳分布式光伏能力的方法。建立包含10 kV主动配电网优化运行模型和380 V辐射型低压配电网分布式光伏的选址定容模型^[14-16]的多电压等级配电网模型。分别用遗传算法和多目标进化算法求解，计算结果说明这种方法的有效性。针对低压配电网中负荷不同的情况，分析分布式光伏接入和调压对中压主动配电网电压水平的影响，以及低压配电网中负荷对接纳分布式光伏和调压方式的影响。

1 中低压配电网的电压调节

中低压配电网联系紧密，拓扑结构^[17]如图1所示，其中 V_H 和 V_L 分别为变压器两侧电压幅值。

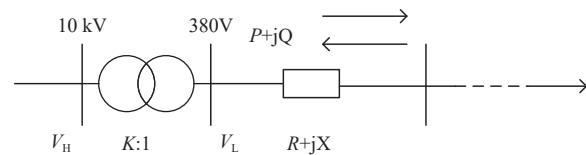


图1 中低压配电网联系拓扑图

Fig. 1 Connection topology of medium and low voltage distribution network

对中压主动配电网中可控设备的合理调控，可以实现对 V_H 的调节，通过改变 V_H 的大小进而改变 V_L 的大小。变压器高压侧有不同的分接头，变压器分接头调节是一种有效的电压控制方法，在国内通常不考虑对分接头进行调整，但是在国际上，特别是欧洲一些国家将分接头调节作为调节低压配电网电压非常重要的手段^[18]，选择不同的分接头改变变压器的变比，可以改变 V_L 的大小，两种方式都通过改变 V_L 的大小影响低压配电网整体电压水平，实现对低压配电网的电压调节。两种方式对低压配电网电压的影响都是间接的，调压后需要对低压配电网进行潮流计算来判断发生电压越限的节点电压是否满足要求，确定一个可以直接判断的指标，采用低压配电网不发生电压越限时 V_H 允许值范围 $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 来指导调压。

$$B_d = \frac{V_d}{V_L} \quad B_x = \frac{V_x}{V_L} \quad (1)$$

$$V_{H\max} = K \frac{V_{\max}}{B_d} \quad V_{H\min} = K \frac{V_{\min}}{B_x} \quad (2)$$

式中： V_{\max} 和 V_{\min} 为配电网电压允许值的上限和下限，在低压配电网中 $V_{\max}=1.07$ ， $V_{\min}=0.9$ ； V_d

和 V_x 为低压配电网的最大和最小电压值； B_d 和 B_x 为低压配电网电压相对 V_L 的最大和最小变化率。

在未考虑电压调节时，中压主动配电网以经济性最优运行，高比例分布式光伏接入导致低压配电网电压越上限。可以选择更大的变压器分接头增大变压器变比 K ，由公式(2) V_H 允许值范围的上下限 $V_{H\max}$ 和 $V_{H\min}$ 增大，也可以改变中压主动配电网中可控设备的运行方式降低 V_H ，通过两种方式将 V_H 限制在允许值 $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 范围内，确保低压配电网电压不发生越限。

低压配电网分布式光伏接入导致的潮流倒送和中压主动配电网可控设备的调节，都会对中压主动配电网整体电压产生影响，采用电压总偏差^[19]反应配电网整体的电压水平，公式表示如下：

$$\Delta V = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_{i,t} - V^*}{V_{\max} - V_{\min}} \right) \quad (3)$$

式中： T 为调度周期； $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点*i*电压； V^* 为系统基准电压幅值，通常为1.0（标么值）。电压总偏差作为检验系统安全性和电能质量的重要指标，值越小说明电压波动越小，电压越能保持在满意的水平上。

2 模型建立

2.1 中压主动配电网优化运行模型

2.1.1 目标函数

中压主动配电网运行经济性最优目标函数为：

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{n_{dg}} C_i^{dg} P_{i,t}^{dg} \Delta t + C_i^g P_{i,t}^g \Delta t + \right. \\ & \sum_{i=1}^{n_{ess}} (\alpha C_i^c P_{i,t}^{ess} + \beta C_i^f |P_{i,t}^{ess}|) \Delta t + \\ & \left. \sum_{i=1}^{n_w} C_i^o M_{i,t} + \sum_{i=1}^{n_il} C_i^{il} P_{i,t}^{il} \Delta t \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

V_H 最小目标函数为：

$$\min(\max V_{H,t}) \quad t \in T \quad (5)$$

式中： n_{dg} 、 n_{ess} 、 n_w 、 n_{il} 分别表示分布式电源、储能设备、可投切无功补偿设备、可中断负荷的数量； C_i^{dg} 、 C_i^g 、 C_i^c 、 C_i^f 、 C_i^o 、 C_i^{il} 分别表示分布式电源单位发电成本、配电网向上级电网购电价格、储能单元充电的折算成本、储能单元放电的折算成本、无功补偿装置的投切成本、可中断负荷的补偿费用； $P_{i,t}^{dg}$ 、 $P_{i,t}^g$ 、 $P_{i,t}^{ess}$ 、 $P_{i,t}^{il}$ 分别表示分布式电

源发电量、配电网向上级电网的购电量、储能单元的充放电功率、可中断负荷的中断功率； $M_{i,t}$ 表示无功补偿设备的投切状态是否发生改变； Δt 为时间间隔； α 和 β 分别表示储能充放电状态； $V_{H,t}$ 表示 t 时刻 V_H 值。

2.1.2 约束条件

1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： P_i 和 Q_i 为节点*i*的有功和无功功率注入量； V_i 和 V_j 分别为节点*i*和*j*的电压， G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点*i*和*j*之间的电导、电纳和电压相角。

2) 线路传输功率约束

$$S_{l,t} \leq S_{l,\max} \quad (7)$$

式中： $S_{l,t}$ 为 t 时刻线路*l*传输功率； $S_{l,\max}$ 为线路传输的最大功率。

3) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{\max} \quad (8)$$

在中压配电网中 $V_{\max}=1.07$ ， $V_{\min}=0.93$ 。

4) 微型燃气轮机约束

$$P_{\min}^{\text{MT}} \leq P_t^{\text{MT}} \leq P_{\max}^{\text{MT}} \quad (9)$$

式中： P_t^{MT} 为 t 时刻微型燃气轮机有功出力； P_{\min}^{MT} 和 P_{\max}^{MT} 为微型燃气轮机有功出力的最小值和最大值。

微型燃气轮机爬坡功率约束

$$|P_t^{\text{MT}} - P_{t-1}^{\text{MT}}| \leq R_t^{\text{MT}} \Delta t \quad (10)$$

式中： R_t^{MT} 为微型燃气轮机爬坡速率； Δt 为时间间隔。

5) 储能约束

在储能系统的充放电过程中，剩余容量用荷电状态(state of charge, SOC)表示。

$$S_{t+\Delta t}^{\text{oc}} = S_t^{\text{oc}} - \frac{\eta P_t^{\text{ess}} \Delta t}{S_{\text{ess}}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{ess}} \leq P_t^{\text{ess}} \leq P_{\max}^{\text{ess}} \\ S_{\min}^{\text{oc}} \leq S_t^{\text{oc}} \leq S_{\max}^{\text{oc}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： S_t^{oc} 为 t 时刻储能的SOC值； S_{\max}^{oc} 和 S_{\min}^{oc} 分别为SOC的上限和下限； S_{ess} 为储能的总容量； η 为储能系统的充放电效率； P_t^{ess} 为 t 时刻的充放电功率， $P_t^{\text{ess}}<0$ 为充电状态， $P_t^{\text{ess}}>0$ 为放电状态， P_{\max}^{ess} 和 P_{\min}^{ess} 分别为储能系统的最大和最小充放电

功率。

6) 无功补偿装置投切约束

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T M_{i,t} \leq M_{\max} \\ M_{i,t} = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： $M_{i,t}$ 为 t 时刻无功补偿装置的投切状态是否发生改变，1 表示发生改变，0 表示保持不变， M_{\max} 表示无功补偿装置在调度周期 T 内的最大动作次数。

7) 可中断负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{il} \leq P_{i,\max}^{il} \\ \sum P_{i,t}^{il} \Delta t \leq P_i^{il} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $P_{i,\max}^{il}$ 为可中断负荷在 t 时刻的最大可中断功率， P_i^{il} 为可中断负荷在调度周期内的最大可中断电量。

2.2 低压配电网分布式光伏选址定容模型

在 380 V 低压配电网中负荷是单相供电，因此分布式光伏单相接入。低压配电网分布式光伏选址定容模型包含两个目标函数，接入分布式光伏容量最大和低压配电网电压升高最小。

2.2.1 目标函数

接入分布式光伏容量最大目标函数为：

$$\max \sum P_i^{\text{PV}} \quad (15)$$

低压配电网电压升高最小目标函数为：

$$\min [\max(V_{i,t}^a, V_{i,t}^b, V_{i,t}^c) - V_n] \quad t \in T \quad (16)$$

式中： P_i^{PV} 为低压配电网节点 i 处分布式光伏接入容量； $V_{i,t}^a$ 、 $V_{i,t}^b$ 、 $V_{i,t}^c$ 分别为节点 i 处 t 时刻 a、b、c 三相的电压； V_n 为基准电压。

2.2.2 约束条件

潮流约束、线路传输功率约束、节点电压约束与中压主动配电网优化运行模型类似。

1) 接入容量约束

$$P_i \in \{P_A, P_B, P_C, \dots\} \quad (17)$$

式中： P_i 为节点 i 处接入的分布式光伏容量； $\{P_A, P_B, P_C, \dots\}$ 为节点 i 处所能接入的分布式光伏容量的集合。

2) 电压三相不平衡度约束

节点电压不平衡度的定义是节点三相电压幅值的偏差除以三相电压幅值的平均值。本文模型采用的是电压幅值平方进行计算，对应的电压幅

值平方不平衡度的范围为 6%。

$$\left\{ \begin{array}{l} -6\% \leq \frac{V_{i,t}^\phi - V_{i,t}^P}{V_{i,t}^P} \leq 6\% \phi \in A, B, C \\ V_{i,t}^P = \frac{1}{3} \sum V_{i,t}^\phi \end{array} \right. \quad (18)$$

式中： $V_{i,t}^\phi$ 为 t 时刻节点 i 处电压幅值的平方值； $V_{i,t}^P$ 为 t 时刻节点 i 处电压幅值平方的平均值。

3 模型求解

3.1 负荷和分布式电源出力的时序特性

在低压配电网中用户的负荷特性与光伏发电功率特性不一致，负荷高峰与光伏功率高峰在不同的时间段，导致低压配电网中节点电压在不同时刻发生显著变化，在白天光伏发电过剩时段会出现节点电压升高，而在夜间重负荷时段则会出现节点电压降低。因此，为了保证分布式光伏接入后配电网的安全运行，必须保证配电网电压在任何时刻都不越限，在模型求解的过程中，需要了解配电网全天各个时段负荷和分布式电源的情况，考虑负荷和分布式电源出力的时序特性。

为了更好地把握电力负荷发展变化的情况，把负荷分为工业类负荷、农业类负荷、商业类负荷和居民负荷 4 类。这 4 类负荷的时序性各有特点，在春夏秋冬 4 季呈现出不同的规律性，负荷曲线见附录 A，图 A1，A2，A3，A4。

风力发电和光伏发电的出力大小主要由地理位置和气候环境所决定，其出力大小具有明显的时序特性。风力发电设备的出力与风力资源直接相关，不同季节风力发电系统出力的时序特性曲线见附录 A，图 A5。光伏发电设备的出力与光照强度密切相关，光照强度受季节和天气的影响，每个季节的光照强度曲线可以分为晴天、阴天和雨天 3 种情况，光伏发电设备出力的时序特性曲线见附录 A，图 A6。根据时序特性，形成春季晴天、春季阴天、春季雨天、夏季晴天、夏季阴天、夏季雨天、秋季晴天、秋季阴天、秋季雨天、冬季晴天、冬季阴天和冬季雨天共计 12 种场景，可以对配电网进行一年的时序全过程模拟^[20]。

3.2 求解步骤

步骤 1：采用多目标进化算法求解低压配电网的选址定容模型，得到分布式光伏的最大接入容量和低压配电网电压升高最小之间的关系，形

成 Pareto 前沿。求解以运行经济性最优为目标函数的中压主动配电网优化运行模型, 得到中压主动配电网运行经济性最优的策略及该运行策略下 12 个场景的 V_H 时序特性。

步骤 2: 根据 Pareto 前沿分布式光伏接入容量对应选址定容结果, 计算出 12 个场景下低压配电网最大和最小电压值, 确定发生电压越限的场景, 得到不考虑电压调节情况下分布式光伏的最大接入容量。对于发生电压越限的场景, 结合变压器分接头的选择和低压配电网的允许电压偏差, 由公式(1) 和(2) 得到对应场景下 V_H 允许值范围 [$V_{H\min}$, $V_{H\max}$]。

步骤 3: 考虑中低压配电网的电压调节, 采用遗传算法求解以 V_H 最小为目标函数的中压主动配电网优化运行模型, 得到 V_H 时序特性; 调节变压器的分接头, 计算对应的 V_H 允许值范围。综合分析全部 12 种场景, 得到考虑一种调压方式和综合两种方式的低压配电网分布式光伏最大接入容量。

4 算例及结果分析

4.1 算例说明

中压主动配电网采用 IEEE33 节点系统进行仿真, 结构如图 2 所示。总负荷 $3.64+j2.23\text{MVA}$, 电压基准值 12.66kV , 中压主动配电网中有大容量光伏电站、小容量光伏、大容量风电场、小容量风机、储能系统、微型燃气轮机、可中断负荷和无功补偿设备。分布式资源的具体参数见附录 B, 表 B1, B2, B3, B4 所示, 配电网分时电价如附录 B 图 B1 所示。各节点的负荷类型如下: 21—25 节点为工业负荷, 30—33 节点为农业负荷, 8—15 节点为商业负荷, 其余节点为居民负荷。

中压主动配电网 29 节点与低压配电网通过降

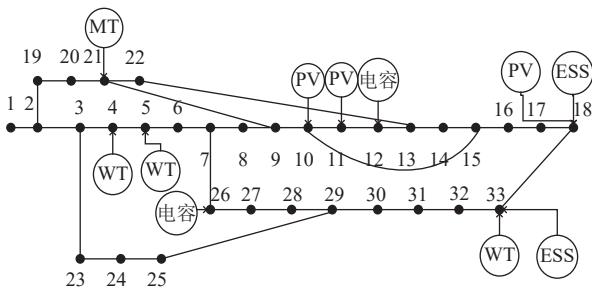


图 2 主动配电网拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of active distribution network

压变压器相连, 29 节点的电压即为 V_H 。变压器低压侧的额定电压为 0.4kV , 变压器在高压侧有 5 个分接头, 分别为 -5% 、 -2.5% 、 0 、 2.5% 和 5% 。

参考 IEEE22 节点系统的拓扑结构, 构建 22 节点辐射型低压配电网, 电压基准值为 380V , 低压配电网中的负荷类型均为居民负荷, 本文假设在低压配电网中各节点负荷大致相同, 各节点负荷在 $2.5\sim3.5\text{kVA}$ 之间随机生成, 各节点负荷的功率因数均为 0.9 , 随机生成的负荷总量为 $59.62+j28.88\text{kVA}$ 。低压配电网中所有节点均可以接入分布式光伏, 可接入的容量为 5 、 6 、 7 、 8 、 9 、 10kW 。

4.2 模型求解

采用多目标进化算法求解分布式光伏选址定容模型, 得到分布式光伏接入容量和低压配电网电压升高之间的关系, 形成 Pareto 前沿, 如图 3 所示, 随着分布式光伏接入容量的增加, 低压配电网的电压升高就越明显。

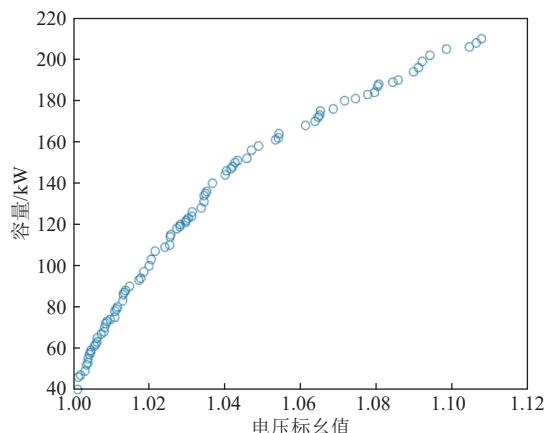


图 3 分布式光伏选址定容模型的 Pareto 前沿

Fig. 3 Pareto frontier of site selecting and capacity determining model of distributed PV power

以分布式光伏接入容量 140kW 为例说明求解过程, 选址定容结果如表 1 所示。

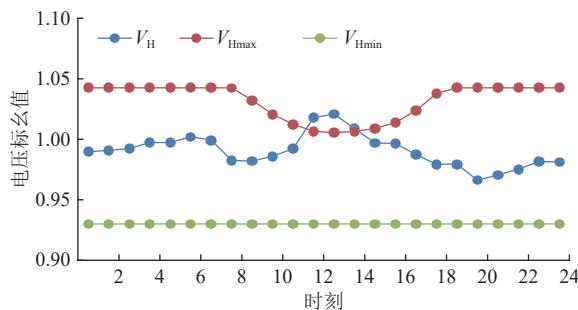
表 1 140kW 分布式光伏选址定容

Table 1 Site selecting and capacity determining of 140kW distributed PV power

接入相	接入位置	接入容量/kW
A 相	6, 7, 12, 16	10, 10, 9, 9
B 相	3, 8, 9, 10, 14	10, 10, 9, 9, 7
C 相	1, 2, 4, 5, 11, 13	10, 10, 10, 10, 7

求解中压主动配电网优化运行模型, 目标函数为运行经济性最优, 得到 12 个场景下中压主

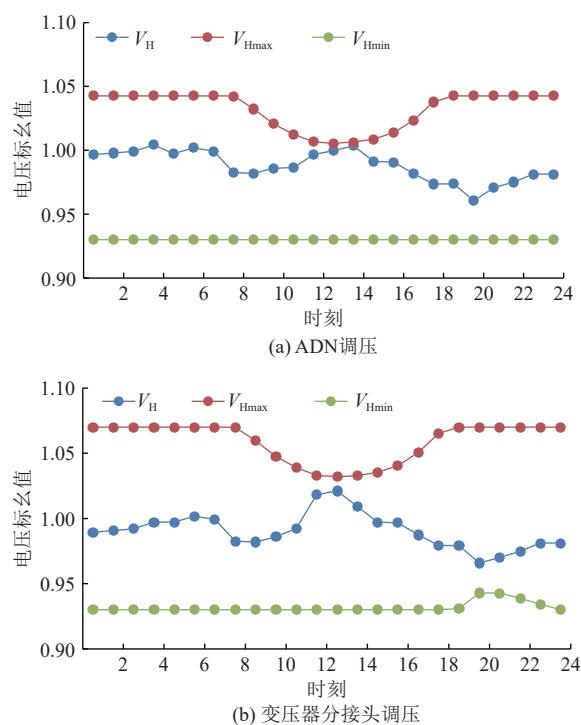
动配电网以经济性最优运行的 V_H 时序曲线。变压器高压侧分接头选择 2.5%，根据 V_H 时序曲线和选址定容结果计算出在 12 个场景下低压配电网最大和最小电压的时序曲线，低压配电网电压偏差允许范围为 -10%~7%，判断各场景电压是否在此范围内，确定发生电压越限的场景。对于发生电压越限的场景，由公式（1）和（2）计算出 V_H 允许值范围 $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 。在所有电压越限的场景中，只列出场景 1 春季晴天的结果，如图 4 所示。

图 4 V_H 值和 V_H 允许值Fig. 4 V_H voltage value and V_H allowable voltage value

由图 4 可知，在时刻 12, 13, 14 处 V_H 超过允许值的上限，低压配电网发生电压越限。在不考虑调压的情况下，场景 1 春季晴天低压配电网无法接纳 140 kW 的分布式光伏。综合分析所有选址定容结果，当接入容量超过 109 kW 时出现电压越限的场景。

对于发生电压越限的场景，考虑采用电压调节策略，调节中压主动配电网的可控设备和改变变压器分接头进行调压。求解中压主动配电网优化运行模型，目标函数为 V_H 最小，得到新的 V_H 时序曲线。负荷和分布式光伏的出力与季节相关，在不同的季节选择不同的分接头进行调压，一年中分接头最多调整 4 次，对低压配电网的运行没有影响，通过变压器分接头改变 $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ ，将变压器分接头由 2.5% 调整为 5%，得到新的 V_H 允许值范围 $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 。调压后的结果如图 5 所示。

对比图 4 和图 5(a)，通过调整中压主动配电网的可控设备可以缓解 V_H 升高，防止发生电压越限，提高低压配电网对分布式光伏的接纳能力。对比图 4 和图 5(b)，改变变压器分接头为 5%， $[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 的上限和下限均升高，使 V_H 在

图 5 调压后 V_H 值和 V_H 允许值Fig. 5 V_H voltage value and V_H allowable voltage value after voltage regulation

$[V_{H\min}, V_{H\max}]$ 范围内，低压配电网的电压不发生越限。

当两种调压方式均可以采用时，对使用一种调压方式依然发生电压越限的场景，可以综合两种调压方式，进一步提高低压配电网对分布式光伏的接纳量。调压后部分场景分布式光伏可接入的最大容量如表 2 所示。其余场景分布式光伏最大容量远大于表中的 4 个场景，对最终结果没有影响因此省略。

表 2 调压后分布式光伏最大接入容量

Table 2 Maximum admitted capacity of distributed photovoltaic power after voltage regulation

场景	ADN 调压 最大接入 容量/kW	变压器分接头 调压最大接入 容量/kW	两种方式 综合最大 接入容量/kW
春季晴天	143	152	170
夏季晴天	156	136	156
秋季晴天	156	157	179
冬季晴天	146	162	178

由表 2 可得分布式光伏最大接入容量为 156 kW，选址定容结果如表 3 所示。

综合上述结果，得到在不同情况下配电网可

接纳的分布式光伏最大容量及渗透率^[21], 考虑中低压配电网的配合, 利用中压主动配电网的调控能力和变压器分接头的调整, 提升了低压配电网接纳分布式光伏能力, 结果如表4所示。

表3 156 kW 分布式光伏选址定容

Table 3 Site selecting and capacity determining of 156 kW Distributed photovoltaic power

接入相	接入位置	接入容量/kW
A相	6, 7, 12, 13, 18	10, 10, 9, 10, 6
B相	5, 8, 9, 14, 15	10, 10, 9, 9, 9, 5
C相	1, 2, 3, 4, 11, 16	10, 10, 10, 10, 10, 9

表4 分布式光伏接入容量及渗透率

Table 4 Admitted capacity and permeability of distributed PV power

调压方式	容量/kW	渗透率/%
无	109	164.54
ADN调压	143	215.86
变压器分接头调压	136	205.29
两种方式综合	156	235.48

4.3 中压主动配电网电压的影响

仍以场景1春季晴天分布式光伏接入140 kW为例, 说明分布式光伏接入和调节可控设备调压对中压主动配电网电压的影响, 如图6所示, (a)、(b)、(c)分别为分布式光伏接入低压配电网前、分布式光伏接入后、调压后的中压主动配电网的电压水平。

相较于中压配电网的负荷和已有的分布式电源容量, 低压配电网接入的140 kW分布式光伏的容量很小, 对中压配电网整体电压影响很小, 对比图6(a)和图6(b), 中压配电网的电压基本没有发生变化, 只对接入的29节点电压即 V_H 和周围节点有电压的抬升作用, 在中午光伏大发时段比较明显, 如表5所示。但接入140 kW分布式光伏会导致低压配电网电压越限, 中压主动配电网通过调节可控设备的运行方式降低电压, 不仅降低了 V_H , 对比图6(b)和图6(c), 中压主动配电网在中午时段电压整体降低, 全天的电压波动明显减小。由表6电压总偏差可知, 分布式光伏的接入使电压总偏差降低, 但影响很小; 调节可控设备调压后, 中压主动配电网的电压总偏差大幅降低, 提升了配电网运行的安全性和电能质量。

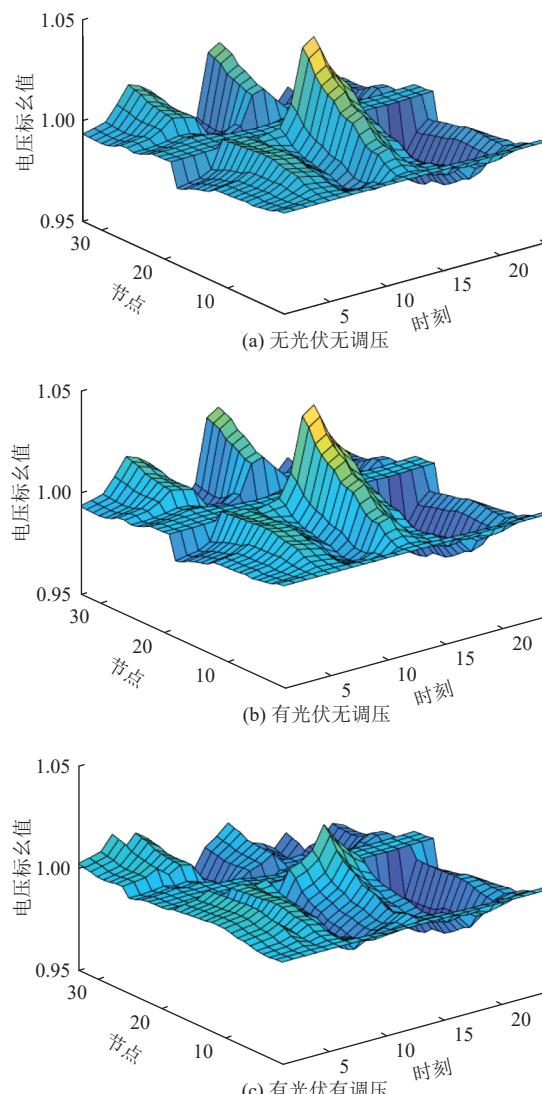


图6 中压主动配电网电压

Fig. 6 Voltage of medium-voltage active distribution network

表5 中午光伏大发时段 V_H 值
Table 5 V_H value of peak distributed PV generation at noon

时刻	无光伏无调压/pu	有光伏无调压/pu	有光伏有调压/pu
12	1.00896	1.01211	0.99084
13	1.01174	1.01510	0.99399
14	0.99972	1.00312	0.99751

表6 电压总偏差

Table 6 Total voltage deviation

无光伏无调压	有光伏无调压	有光伏有调压
0.2132	0.2130	0.1718

4.4 负荷的影响

改变22节点低压配电网的负荷，各节点负荷分别在1.5 kVA~2.5 kVA、2 kVA~3 kVA、2.5 kVA~3.5 kVA、3 kVA~4 kVA之间随机生成，计算不同负荷低压配电网接入的分布式光伏容量及渗透率，结果如表7所示。

表7 分布式光伏接入容量及渗透率

Table 7 Admitted capacity and permeability of distributed PV power

编号	负荷/kVA	调压方式	容量/kW	渗透率/%
1 35.08+j16.99		无	137	390.54
		ADN调压	163	464.65
		变压器分接头调压	137	390.54
		两种方式综合	163	464.65
2 48.74+j23.61		无	104	192.02
		ADN调压	134	247.42
		变压器分接头调压	124	228.95
		两种方式综合	153	282.49
3 59.62+j28.88		无	109	164.54
		ADN调压	143	215.86
		变压器分接头调压	136	205.29
		两种方式综合	156	235.48
4 68.53+j33.19		无	58	76.18
		ADN调压	101	132.65
		变压器分接头调压	97	127.40
		两种方式综合	126	165.48

为应对可能出现的低压配电网电压升高导致电压越限的问题，变压器应选择尽可能大的分接头，而变压器分接头的选择和负荷量密切相关，由负荷和光伏出力的时序特性可知，在夜间负荷达到高峰时，光伏出力接近于零，低压配电网电压呈现由首端到末端逐渐减低的趋势，如果变压器分接头选择太大可能会出现电压越下限的情况。在负荷较小时变压器分接头可以始终保持在5%，只能调节中压主动配电网中的可控设备提高分布式光伏的接入量，如表7编号1。随着低压配电网中负荷增大，变压器保持5%不变会出现夜间电压越下限的场景，无法满足全年12个场景的电压约束，可以在不同季节改变变压器分接头调压，如表7编号2和3，在春、秋、冬3季选择分接头5%，在夏季选择分接头2.5%。低压配电网中负荷进一步增大，变压器分接头在各季节的

选择也随之发生变化，如表7编号4，在春、秋、冬3季选择分接头2.5%，在夏季选择分接头0。

由表7可得，随着配电网中负荷量的增加，配电网中分布式光伏的最大接入容量呈现一定的波动性，但渗透率不断降低。在变压器分接头选择相同的情况下，低压配电网负荷越大，其自身所能消纳的分布式光伏所发的电能就越多，因此可接纳更多的分布式光伏，如编号2和编号3。将编号2和3看成一个整体，虽然从编号1到4负荷逐渐增大，但变压器分接头的选择为5%，2.5%和0，分接头的选择越来越小，制约了低压配电网在光伏大发时应对电压升高的能力，导致分布式光伏的接入量大幅降低。结合不同负荷情况下可以采用的调压方式，改变变压器分接头进行调压受低压配电网负荷的影响，在负荷较小时不存在调节变压器分接头的调压方式；运用中压主动配电网的可控设备进行 V_H 调节只与中压配电网中的可控设备有关，不受低压配电网中负荷的影响。由于变压器分接头档位不连续，无法实现对电压的连续调节，用中压配电网的可控设备可以实现对电压的连续调节，但会牺牲配电网运行的经济性。提高低压配电网分布式光伏的接纳量是本文的首要目标，在根据低压配电网中负荷量选择最优的分接头的基础上，结合中压主动配电网的可控设备进行调压，能够最大限度的提高低压配电网对分布式光伏的接纳能力同时保证配电网运行的经济性。

5 结论

1)相较于只考虑低压配电网单一电压等级不考虑调压的情况，调节中压配电网中的可控设备和变压器的分接头均可以缓解高比例分布式光伏接入导致的电压越限问题，提高低压配电网所能接纳的分布式光伏容量。

2)低压配电网分布式光伏接入导致的潮流倒送对中压主动配电网的电压影响很小，只是使接入点和周围节点电压略有抬升；调节可控设备调压不仅降低了 V_H ，还使中压主动配电网电压波动明显减小，电压总偏差大幅降低。

3)负荷通过影响低压配电网分布式光伏消纳和变压器分接头的选择影响低压配电网接纳分布式光伏的能力。在分接头一定时，负荷越大，

分布式光伏接纳量越大；当负荷增大导致分接头的选择发生变化时，负荷越大，变压器变比越小，分布式光伏接纳量越小。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

参考文献

- [1] 候健敏,周德群. 我国分布式能源的政策演变与三阶段、四模式发展[J]. 经济问题探索, 2015(2): 126–132.
HOU Jianmin, ZHOU Dequn. Policy evolution and three-stage and four mode development of distributed energy in China[J]. Inquiry Into Economic Issues, 2015(2): 126–132(in Chinese).
- [2] Mejbaur H M, Peter W. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(62): 1195–1208.
- [3] 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): 146–140.
XU Xiaoyan, HUAN 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): 146–140(in Chinese).
- [4] Benoit B, Serdar K, Roman B, et al. Voltage control with PV inverters in low voltage networks-in depth analysis of different concepts and parameterization criteria[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 177–185.
- [5] Sam W, Johan D. Optimal local reactive power control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1624–1633.
- [6] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 26–31.
SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 26–31(in Chinese).
- [7] AlKaabi S S, Khadkikar V, Zeineldin H H. Incorporating PV inverter control schemes for planning active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1224–1233.
- [8] 梁海深, 李盛伟, 白临泉, 等. 基于SNOP的柔性配电网中分布式电源最大准入容量计算[J]. 电力建设, 2018, 39(8): 69–76.
LIANG Haishen, LI Shengwei, BAI Linquan, et al. Allowable DG penetration capacity calculation of SNOP-based flexible distribution network[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(8): 69–76(in Chinese).
- [9] Siano H P, Chen P, Chen Z, et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(5): 598–608.
- [10] Ochoa L F, Dent C J, Harrison G P. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 87–95.
- [11] Capitanescu F, Ochoa L F, Margossian H, 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.
- [12] 蔡永翔, 唐巍, 张博, 等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4843–4854.
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4843–4854(in Chinese).
- [13] 钟清. 主动配电网知识读本[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [14] 任洪伟, 韩丛英, 裴玮, 等. 基于多目标优化模型的分布式电源选址方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 64–69.
REN Hongwei, HAN Conying, PEI Wei, et al. Research on distributed generation locating based on multi-objective optimization model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 64–69(in Chinese).
- [15] 章力, 高元海, 熊宁, 等. 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 43–48.
ZHANG LI, GAO Yuanhai, XIONG Ning, et al. Siting and sizing of distributed photovoltaic power station considering reverse power flow constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 43–48(in Chinese).
- [16] 张君则, 艾欣. 基于粒子群算法的多类型分布式电源并网位置与运行出力综合优化算法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3372–3377.
ZHANG Junze, AI Xin. Particle swarm optimization based comprehensive optimization algorithm for grid-connected positions and operation parameters of multi-type distribu-

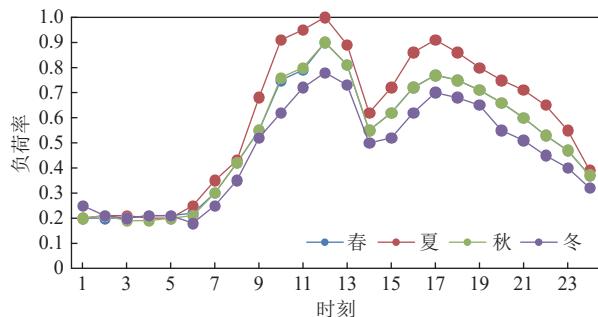
- tion generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3372–3377(in Chinese).
- [17] 常莉敏. 光伏高渗透配电网无功电压优化控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [18] 蔡永翔, 唐巍, 徐鸥洋, 等. 含高比例户用光伏的低压配电网电压控制研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 220–229.
CAI Yongxiang, TANG Wei, XU Ouyang, et al. Review of voltage control research in LV distribution network with high proportion of residential PVs[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 220–229(in Chinese).
- [19] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51–62.
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51–62(in Chinese).
- [20] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58–63+128.
- LI Liang, TANG Wei, BAI Muket, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58–63+128(in Chinese).
- [21] 黄巍, 吴俊勇, 鲁思棋, 等. 电压偏差和谐波约束下配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 Systems Protection and Control, 2016, 44(6): 49–55(in Chinese).

收稿日期: 2020-11-29

作者简介:

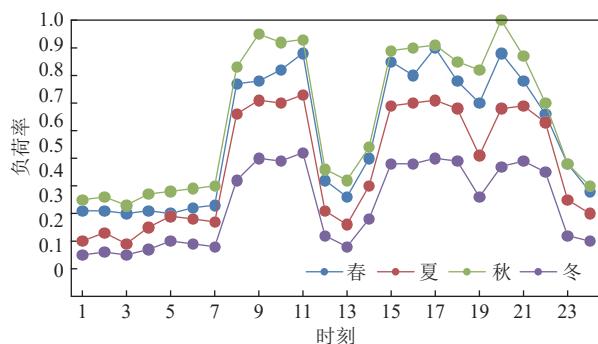
赵冬梅(1965), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制, 新能源发电与智能电网; 任耀宇(1994), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为主动配电网, 新能源发电, E-mail: 2021959948@qq.com; 程雪婷(1991), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电网运行分析与控制、新能源并网消纳、电网运行经济性。

附录 A



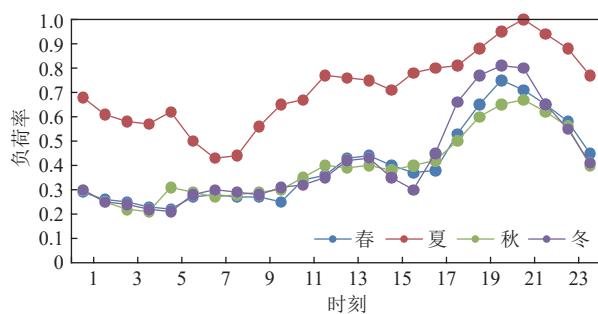
附图 A1 工业负荷的日出力时序特性曲线

Fig. A1 Timing characteristics of daily power output of industrial load



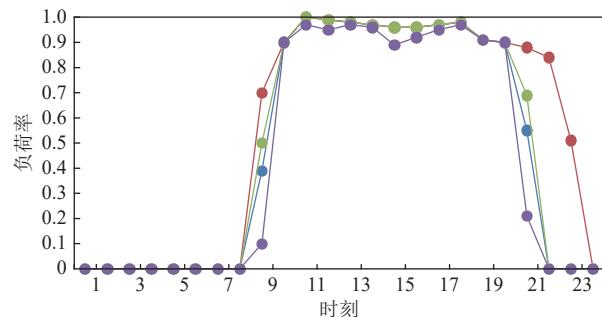
附图 A2 农业负荷的日出力时序特性曲线

Fig. A2 Timing characteristics of daily power output of agricultural load



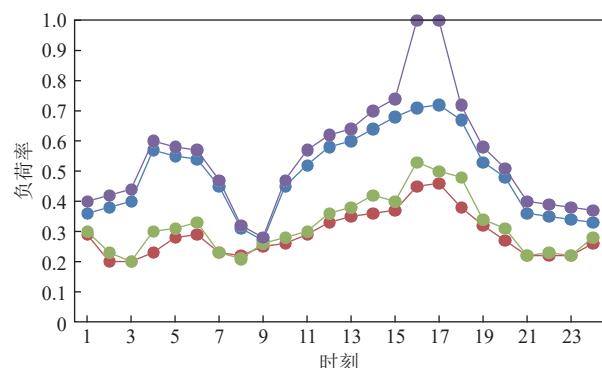
附图 A3 居民负荷的日出力时序特性曲线

Fig. A3 Timing characteristics of daily power output of resident load



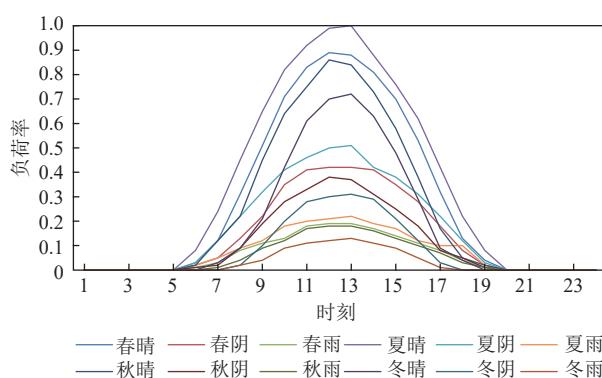
附图 A4 商业负荷的日出力时序特性曲线

Fig. A4 Timing characteristics of daily power output of commerical load



附图 A5 风力发电设备的日出力时序特性曲线

Fig. A5 Timing characteristics of daily power output of wind generators



附图 A6 光伏发电设备的日出力时序特性曲线

Fig. A6 Timing characteristics of daily power output of photovoltaic generators

附录 B

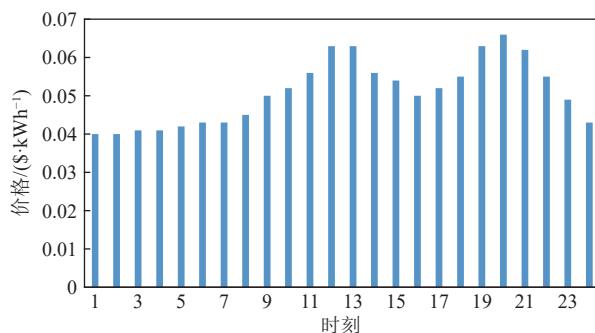


图 B1 分时电价

Fig. B1 Time sharing price

表 B1 分布式发电单元参数

Table B1 Parameters of distributed generators

资源类型	接入节点	功率/kW	发电成本/(\$/kW·h)	是否可控
大容量光伏电站	18	1000	0.043	否
大容量风电场	33	1000	0.036	否
小容量风机	4, 5	100	0.036	否
小容量光伏	10, 11	100	0.043	否
微型燃气轮机	21	200	0.05	是

表 B2 储能参数

Table B2 Parameters of battery storage

接入位置	充放电功率/(kW)	容量/(kW·h)	充放电效率	充放电成本/(\$/kW·h)
18, 33	[−150, 150]	750	0.95	0.005

表 B3 可中断负荷参数

Table B3 Parameters of interruptible loads

接入位置	最大中断功率/(kW)	最大中断电量/(kW·h)	中断成本/(\$/kW·h)
25	50	200	0.030
32	100	600	0.058

表 B4 可投切电容器组参数

Table B4 Parameters of switchable capacitor banks

设备类型	接入位置	安装容量/(kvar)	允许动作次数	单次操作成本/(\$/次)
电容器	12	300	5	5
电容器	26	300	5	5