

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.007

## 计及综合因素的光伏接入配电网优选研究

许鸣吉<sup>1</sup>, 沈磊<sup>1</sup>, 李胜<sup>2</sup>, 郭健<sup>2</sup>, 刘嘉宝<sup>1</sup>

(1. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072;

2. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 光伏的接入改变了配电网结构, 突破了传统电源向配电网单相供电的格局, 改变了系统潮流, 从而不可避免地会对配电网的电压质量、经济指标和安全性能产生影响。针对光伏接入配电网可能带来的诸多影响, 文中提出了一种基于交互式决策数学模型的多目标优化方法。首先, 推导光伏在不同接入位置、不同接入容量、密集和分散接入时对台区电压、线路损耗和电压稳定性的变化规律; 其次, 建立了光伏接入的优选模型; 最后, 分析接入光伏对配电网关键指标的影响, 求解出光伏接入的最优选方案。由德 31 德都北馈线的分析结果可知, 该方法能为光伏发电项目的规划设计提供理论依据。

**关键词:** 光伏; 配电网; 电压质量; 经济指标; 安全性能; 多目标交互式模型

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)02-0046-07

## 0 引言

在打造能源互联网和电力行业转型升级的背景下, 分布式电源在电力系统中的比重快速增加<sup>[1]</sup>。光伏作为一种应用广泛的分布式电源, 一般接入 10 kV 及以下电压的配电网<sup>[2]</sup>。光伏的接入改变了配电网的结构<sup>[3]</sup>, 突破了传统电源向配电网单相供电的格局, 改变了系统潮流, 这不可避免地会对配电网的电压质量、经济指标和安全性能产生影响<sup>[4-8]</sup>。目前, 对光伏接入配电网的规划设计主要分为 2 个领域: 在现有的配电网中对光伏的接入进行选址定容<sup>[9]</sup>; 综合协调已接入光伏的配电网, 进行网络重构<sup>[10]</sup>。

早期对光伏选址定容问题的研究, 以系统的单一指标为优化目标。文献[11]优选了配电网中分布式发电单元位置, 研究了网损最小的分布式电源最优接入位置; 文献[12]得到了光伏满足电压偏差范围的准入容量, 提出了保证电压偏差要求的具体措施; 文献[13]运用时域仿真法, 考察了光伏电站接入配电网电缆线路引发故障对母线暂态电压稳定性的影响。上述文献未同时兼顾考察系统的电压质量、经济指标和安全性能, 难以满足电网发展的需求。

文献[14]考虑了光伏对系统电压和网损的影响, 以某时刻为基准, 计算光伏准入容量和位置。目前, 大量文献均选取某时刻的负荷数据, 未考虑

收稿日期: 2020-09-12; 修回日期: 2020-10-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201203-002); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2017370-2); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2018004-3)

配电网潮流的动态变化, 缺乏对各时刻负荷变化的联系与比较。此外, 大量文献均以 IEEE 33 节点系统为算例进行分析, 该方法不能满足我国配电网的实际要求, 缺乏实用性。

有鉴于此, 文中首先基于国网上海市北供电公司所辖 35 kV 德都站 10 kV 馈线德 31 德都北的配电网系统, 从配电网的电压质量、经济指标和安全性能角度出发, 推导光伏在不同接入位置、不同接入容量、密集和分散接入时对台区电压、线路损耗和电压稳定性的影响。其次, 依据建立的光伏接入的优选模型, 提出一种基于交互式决策数学模型的多目标优化方法。最后, 依据德 31 德都北馈线的分析结果, 研究接入光伏对配电网关键指标的影响, 并求解出光伏接入的最优位置和最优容量方案。

## 1 光伏接入对配电网关键指标的影响分析

## 1.1 光伏出力模型

并网运行光伏发电系统可以将太阳能电池阵列输出的直流电转化为与电网同压、同幅、同频、同相的交流电, 实现与电网连接, 同时向电网输送电能<sup>[15]</sup>。

光伏出力与地区光照强度相关, 光伏输出功率  $P$  可表示为<sup>[16]</sup>:

$$P = hS\eta \quad (1)$$

式中:  $h$  为某时段的光照强度;  $S$  为光伏电池板总面积;  $\eta$  为光电转化效率。光照强度  $h$  可近似看成服从 Beta 分布, 可表示为:

$$f(h) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{h}{h_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{h}{h_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: $h_{\max}$ 为某时段的最大光照强度; $\alpha, \beta$ 分别为该时段 Beta 分布的时间参数; $\Gamma$ 为 Gamma 函数。

### 1.2 光伏接入对配电网电压质量的影响

光伏接入会使馈线上各台区电压发生改变,对配电网电压质量产生影响<sup>[17]</sup>。接入光伏的馈线简化模型如图 1 所示。图 1 中定义变电站母线电压为  $U_0$ , 馈线上共有  $N$  个台区, 第  $n$  个台区的电压为  $U_n$ ; 负荷为  $P_n + jQ_n$ ; 线路的单位阻抗为  $r + jx$ ; 第  $n-1$  个与第  $n$  个台区间的线路长度为  $l_{n-1,n}$ ; 位于台区  $i$  处的光伏注入功率为  $P_{PVi}$ 。

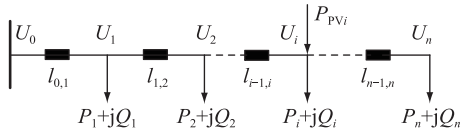


图 1 接入光伏的馈线简化模型

Fig.1 Simplified model of feeder connected to PV

当台区  $n$  在光伏接入点  $i$  之前 ( $0 < n < i$ ), 第  $n-1$  个台区到第  $n$  个台区的压降  $\Delta U_{n-1,n}$  为:

$$\Delta U_{n-1,n} = U_{n-1} - U_n = \frac{\left[ \sum_{k=n}^N (P_k - P_{PV}) \right] r l_{n-1,n} + \sum_{k=n}^N Q_k x l_{n-1,n}}{U_{n-1}} \quad (3)$$

由式(3)可知,当注入馈线的光伏功率  $P_{PV}$  比第  $n$  个台区及之后的台区负荷  $P_k$  总和大时,第  $n-1$  个台区到第  $n$  个台区的压降  $\Delta U_{n-1,n}$  为负,第  $n$  个台区电压升高。否则,台区电压降低。

当台区  $n$  在光伏接入点  $i$  之后 ( $i < n < N$ ), 第  $n-1$  个台区到第  $n$  个台区的压降  $\Delta U_{n-1,n}$  为:

$$\Delta U_{n-1,n} = \frac{\sum_{k=n}^N P_k r l_{n-1,n} + \sum_{k=n}^N Q_k x l_{n-1,n}}{U_{n-1}} \quad (4)$$

由式(4)可知,第  $n$  个台区的电压不变,始终比第  $n-1$  个台区的电压低。

### 1.3 光伏接入对配电网经济指标的影响

配电网的线路损耗是衡量系统经济性的最重要指标。当台区  $n$  在光伏接入点  $i$  之前 ( $0 < n < i$ ), 第  $n-1$  个台区到第  $n$  个台区的线路损耗  $\Delta S_{n-1,n}$  为:

$$\Delta S_{n-1,n} = (r l_{n-1,n} + j x l_{n-1,n}) \left\{ \left[ \sum_{k=n}^N (P_k - P_{PV}) \right]^2 + \left( \sum_{k=n}^N Q_k \right)^2 \right\} / U_{n-1}^2 \quad (5)$$

由式(5)可知,当注入馈线的光伏功率  $P_{PV}$  等于第  $n$  个台区及之后的台区负荷  $P_k$  总和时,线损  $\Delta S_{n-1,n}$  最小。

当台区  $n$  在光伏接入点  $i$  之后 ( $i < n < N$ ), 第  $n-1$  个台区到第  $n$  个台区的线损  $\Delta S_{n-1,n}$  为:

$$\Delta S_{n-1,n} = \frac{\left( \sum_{k=n}^N P_k \right)^2 + \left( \sum_{k=n}^N Q_k \right)^2}{U_{n-1}^2} (r l_{n-1,n} + j x l_{n-1,n}) \quad (6)$$

由式(6)可知,线损大小没有变化。

### 1.4 光伏接入对配电网安全性能的影响

配电网作为电网的末端,无需像主网一样考虑频率稳定、静态稳定、动态稳定和暂态稳定。从安全性能考虑,光伏接入会改变配电网的静态电压临界值,对系统的电压稳定性产生一定影响。

根据复功率的定义,支路电流  $\dot{I}_{ij}$  表示为:

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{S}_j^*}{\dot{U}_j} = \frac{P_j - jQ_j}{U_j \angle (-\delta_j)} \quad (7)$$

根据 VCR 特性,支路电流  $\dot{I}_{ij}$  可表示为:

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\Delta \dot{U}_{ij}}{Z_{ij}} = \frac{U_i \angle \delta_i - U_j \angle \delta_j}{(r + jx) l_{ij}} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8),按实部和虚部展开得:

$$P_j r l_{ij} + Q_j x l_{ij} = U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j) - U_j^2 \quad (9)$$

$$P_j x l_{ij} - Q_j r l_{ij} = U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (10)$$

联立式(9)和式(10),消去  $(\delta_i - \delta_j)$  项得:

$$U_j^4 + (2P_j r l_{ij} + 2Q_j x l_{ij} - U_i^2) U_j^2 + l_{ij}^2 (r^2 + x^2) (P_j^2 + Q_j^2) = 0 \quad (11)$$

上述方程有实数解的条件为:

$$U_i^4 - 4l_{ij}^2 (rP_j + xQ_j) - 4l_{ij}^2 (xP_j + rQ_j)^2 \geq 0 \quad (12)$$

因此,可得支路的电压稳定性指标  $U_s$  为:

$$U_s = 4l_{ij}^2 [(xP_j - rQ_j)^2 - (xQ_j + rP_j) U_i^2] / U_i^4 \quad (13)$$

由式(13)可知,若配电网运行稳定,则  $U_s < 1$ ;  $U_s$  越小,表明系统的静态电压稳定性越高。

## 2 光伏优选的多目标交互式模型

### 2.1 目标函数

将光伏接入的位置容量优选问题转化为多目标优化问题,选择台区电压、线路损耗和电压稳定性作为目标函数。

(1) 台区电压目标表示各台区电压与母线电压的偏差程度,可表示为:

$$f_1 = \min U_q(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\Delta U_{n-1,n}(\tau)}{U_0(\tau)} \right| \quad (14)$$

(2) 线损目标为馈线总线损与各台区负荷总和

之比,即线损率,可表示为:

$$f_2 = \min S_1(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta S_{n-1,n}(\tau)}{\left( \sum_{n=1}^N P_n^2(\tau) + \sum_{n=1}^N Q_n^2(\tau) \right)} \quad (15)$$

(3) 电压稳定性目标选取各支路中电压稳定性指标的最大值,可表示为:

$$f_3 = \max U_s(\tau) = \max [U_{s,1}(\tau), U_{s,2}(\tau), \dots, U_{s,n}(\tau)] \quad (16)$$

## 2.2 约束条件

(1) 台区注入功率平衡的约束<sup>[15]</sup>:

$$P_{p,i}(\tau) = \sum_{j=1}^n [f_{ij} P_{ij}(\tau)] = P_{PV,i}(\tau) - P_{L,i}(\tau) \quad (17)$$

式中: $P_{p,i}(\tau)$ 为台区*i*在 $\tau$ 时刻的有功功率; $f_{ij}$ 为潮流方向矩阵中的元素; $P_{PV,i}(\tau)$ 为光伏在台区*i*在 $\tau$ 时刻的出力; $P_{L,i}(\tau)$ 为台区*i*的有功负荷。

(2) 台区电压的约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i(\tau) \leq U_{i,\max} \quad (18)$$

式中: $U_{i,\max}, U_{i,\min}$ 分别为台区*i*电压幅值的上下限。

(3) 支路最大电流的约束:

$$I_{ij}(\tau) \leq I_{ij,\max} \quad (19)$$

式中: $I_{ij,\max}$ 为支路*ij*允许流过的最大电流。

(4) 变压器最大容量的约束:

$$S_k(\tau) \leq S_{k,\max} \quad (20)$$

式中: $S_k(\tau), S_{k,\max}$ 分别为变电站中变压器*k*在 $\tau$ 时刻的功率值和最大容量。

(5) 光伏出力的约束:

$$P_{PV,i,\min} \leq P_{PV,i}(\tau) \leq P_{PV,i,\max} \quad (21)$$

式中: $P_{PV,i,\max}, P_{PV,i,\min}$ 分别为光伏*i*出力的上下限。

## 2.3 多目标交互式决策数学模型

为优化各个目标使其同时达到综合的最优值,引入多目标交互式决策数学模型<sup>[18]</sup>,可表示为:

$$\max [f_1(X), f_2(X), f_3(X)] \quad \text{s.t.} \quad X \in S \quad (22)$$

式中: $f_1(X), f_2(X), f_3(X)$ 分别为台区电压单目标、线路损耗单目标和电压稳定性单目标; $S$ 为 $X$ 的约束集。将光伏接入的优选问题中,决策变量代表每一个台区接入的光伏容量。

对3个单目标的最优解 $f_{1,\min}, f_{2,\min}, f_{3,\min}$ 进行归一化处理,得到单目标满意度函数 $\xi_1(X), \xi_2(X), \xi_3(X)$ ,可表示为:

$$\xi_i(x) = \frac{f_{i,\max} - f_i(X)}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (23)$$

式中: $f_{1,\max}, f_{2,\max}, f_{3,\max}$ 分别为未接入光伏前馈线的

台区电压目标、线路损耗目标和电压稳定性目标。

令 $\xi(X) = [\xi_1(X) \ \xi_2(X) \ \xi_3(X)]^T$ 为综合目标满意度函数。 $\xi_1^*(X), \xi_2^*(X), \xi_3^*(X)$ 分别为 $\xi_1(X), \xi_2(X), \xi_3(X)$ 的最佳期望值,理论值为1。则 $\xi(X)$ 的最佳期望值 $\xi^*(X) = [\xi_1^*(X) \ \xi_2^*(X) \ \xi_3^*(X)]^T$ 。

为在约束集*S*内求得决策向量解 $X^*$ ,使 $\xi(X)$ 最逼近 $\xi^*(X)$ 。定义整体均衡度决策函数*f*为:

$$f = l(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 [\xi_i(X) - \xi_i^*(X)]^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (24)$$

式(24)中一定程度上存在如下关系: $l(x)$ 越小, $\xi_i(X)$ 越大, $f_i(x)$ 越小。即各个目标函数越逼近各自的最佳目标值。所以, $l(X)$ 能够充分实现多个目标函数的整体均衡,既尽最大可能实现了各自的利益最大化,又同时兼顾了各方的矛盾,成为各方均能接受的满意方案。

## 2.4 粒子群算法求解流程

粒子群算法具体求解步骤如下。

步骤一:随机初始化光伏的容量与位置;

步骤二:对初始化种群进行潮流计算,计算得到各节点的电压值;

步骤三:对种群中每个粒子的适应值进行计算,并更新局部最优值与全局最优值;

步骤四:判断迭代次数是否满足最大迭代次数,若满足则输出结果,若不满足则转到步骤五;

步骤五:采用云模型模糊控制规则对学习因子和惯性权重进行调节;

步骤六:更新种群中光伏的位置与容量;

步骤七:判断每个粒子的光伏容量是否越限,若不越限则转到步骤二,若越限则将越限的容量更新为容量的边界值后转到步骤二。

## 3 德 31 德都北案例分析

### 3.1 案例描述

文中选取国网上海市北供电公司所辖月浦地区 35 kV 德都站 10 kV 馈线德 31 德都北进行分析,该馈线所送 21 个台区(包括 18 个杆变、3 个配电站)以居民负荷为主,负荷密度大。将德 31 的馈线模型简化,如图 2 所示,简化模型中标识了各台区编号和支路阻抗,阻抗单位为  $\Omega/\text{km}$ 。

各台区负荷由配电负荷检测系统 TsRun 实时监测。德 31 馈线的线路阻抗为  $0.125 + j0.08 \ \Omega/\text{km}$ ; 2019 年负荷最高日 7 月 30 日 12:45 时刻总负荷为  $3\ 275.20 \ \text{kW} + j605.10 \ \text{kvar}$ ,母线电压为  $10.39 \ \text{kV}$ 。

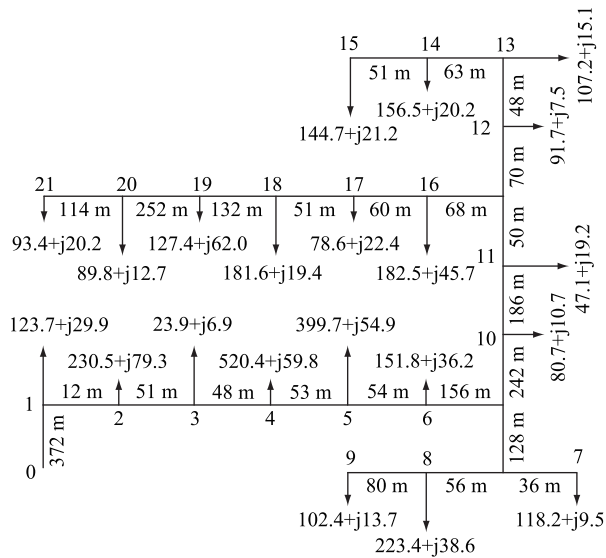


图2 德31德都北馈线的简化模型

Fig.2 Simplified feeder model of De 31 Dedubei

### 3.2 接入光伏对关键指标的影响分析

#### 3.2.1 光伏接入容量的变动对指标的影响

在台区11处分别接入0.5 MW, 1.0 MW, 1.5 MW, 2.0 MW, 4.0 MW 光伏, 并网运行功率因素为0.95, 各台区的电压变化如图3所示。在未接入光伏前, 各台区电压沿馈线辐射方向逐渐下降。光伏的接入改变了系统的潮流方向, 提升了各台区电压。随着光伏容量的增加, 对各台区电压的支撑作用明显增强, 光伏接入点之前的台区电压先依次降低后升高, 之后的台区电压依次降低, 光伏接入点所在的台区局部电压最高。当光伏容量过高时, 该台区电压可能会越过电压上限。

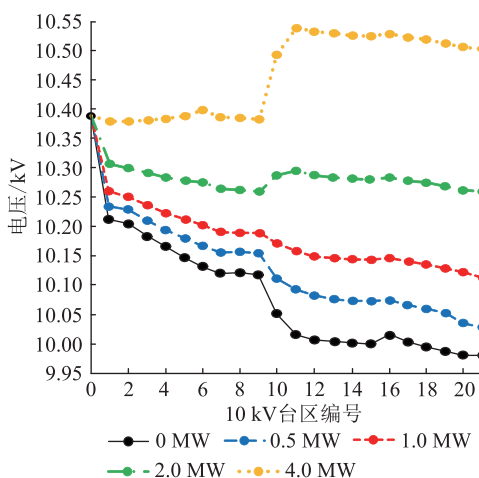


图3 台区11接入不同容量光伏时的电压分布曲线

Fig.3 Voltage distribution curve of area 11 in different photovoltaic capacity

随着台区11接入的光伏容量不断增加, 系统网损的变化如图4所示。网损呈现先减少后增加的趋势, 验证了光伏接入容量不是越大越好, 当注入馈

线的光伏功率 $P_{PV}$ 等于第 $n$ 个台区及之后的台区负荷 $P_k$ 总和时, 网损 $\Delta S_{n-1,n}$ 最小。

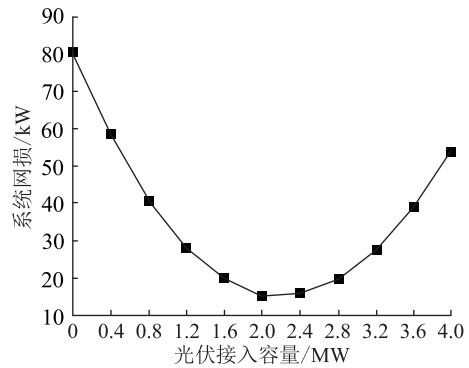


图4 台区11接入不同容量光伏时的系统网损曲线

Fig.4 Network loss distribution curve of area 11 in different photovoltaic capacity

在台区11接入不同容量光伏时的静态电压临界值曲线如图5所示, 系统静态电压临界值随着光伏接入容量的增加而变大, 这说明当系统中负荷骤增时, 光伏接入容量越大, 系统的电压稳定性越差。

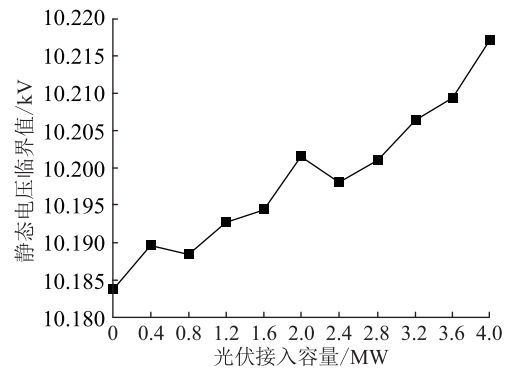


图5 台区11接入不同容量光伏时的静态电压临界曲线

Fig.5 Static voltage critical curve of area 11 in different photovoltaic capacity

#### 3.2.2 光伏接入位置的变动对指标的影响

分别在台区1、台区11、台区15和台区21处接入2 MW 光伏, 各台区电压分布如图6所示。光伏接入的位置不同, 各台区电压大小分布不同。光伏接入处越靠近馈线末端, 对电压的提升作用越明显, 但可能会导致在馈线终端的台区电压越过上限。所以光伏适宜接入馈线中间偏终端的台区。

分别在不同台区接入2 MW 光伏, 系统的网损曲线如图7所示。接入适度光伏能减少系统网损, 在台区11和台区16处接入光伏时, 系统网损明显能降到最低的范畴, 这表明光伏适宜接入馈线中间偏终端的台区。

分别台区1、台区11和台区15处接入2 MW 光伏, 各台区的静态电压临界值分布如图8所示。随着光伏的接入位置越靠近馈线末端, 系统的静态



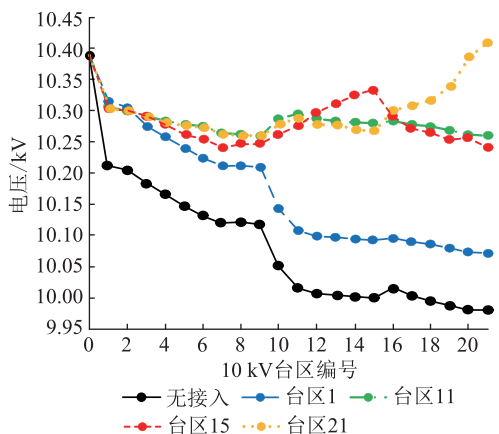


图6 不同台区接入2 MW 光伏时的电压分布曲线  
Fig.6 Voltage distribution curve when 2 MW photovoltaic is connected to different stations

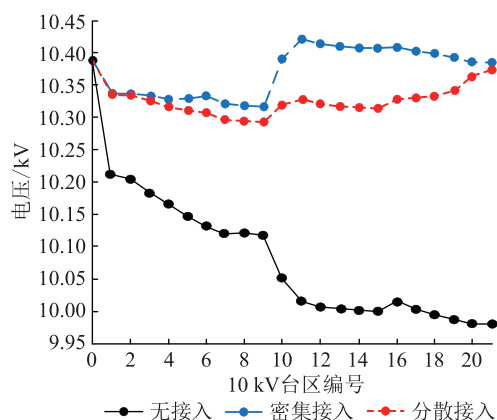


图9 密集接入和分散接入时的电压分布曲线  
Fig.9 Voltage distribution curve of dense access and decentralized access

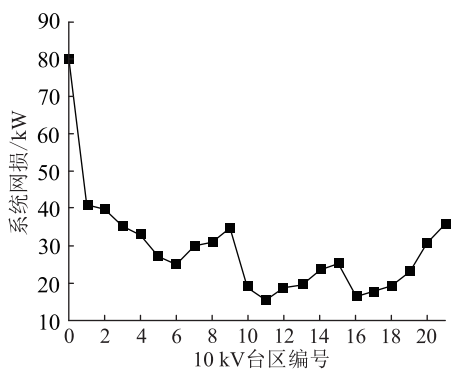


图7 不同台区接入2 MW 光伏时的系统网损曲线  
Fig.7 Network loss distribution curve when 2 MW photovoltaic is connected to different stations

电压临界值明显增大,这说明当系统中负荷发生突变时,光伏接入位置越靠近终端,系统的电压稳定性越差。

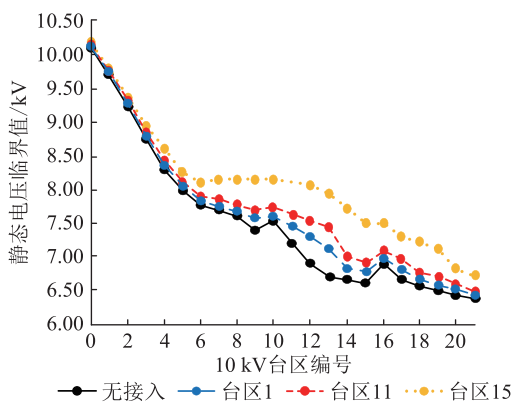


图8 台区位置对系统静态电压临界值的影响曲线  
Fig.8 Static voltage critical curve when photovoltaic is connected to different stations

### 3.2.3 光伏的密集和分散接入对指标的影响

在台区11处集中接入3 MW 光伏、分别在在台区1、台区11和台区21分散接入1 MW 光伏,系统的电压分布曲线如图9所示。

由图9可知:

- (1) 密集接入引起接入台区的电压骤升或骤降,分散接入能均衡提升各台区电压。
- (2) 密集接入时,系统网损为 22.95 kW;分散接入时,系统网损为 11.57 kW。较密集接入,各台区分散接入光伏能有效降低系统网损。
- (3) 密集接入时,光伏接入容量越大,系统的静态电压临界值越大,系统的电压稳定性越差。分散接入时,接入点越多越能分散对系统静态稳定性的影响。

### 3.3 对光伏接入优选问题的分析

对光伏接入的优选问题进行分析,受地理位置城市规划和管理成本等因素影响,发展部门设置最多可接入3处光伏,可接入台区编号为1至21,可接入的容量不大于2 MW 且均为0.1 MW 的整数倍。对2019-07-30的07:00—19:00德31德都北馈线进行分析,配电负荷检测系统每15 min 采集一次数据,共获得48组数据。考虑到电压、网损和稳定性指标同等重要, $\xi_1(X)$ , $\xi_2(X)$ , $\xi_3(X)$ 均取1。如图10所示,各时刻平均的整体均衡度在迭代43次时收敛于0.182。

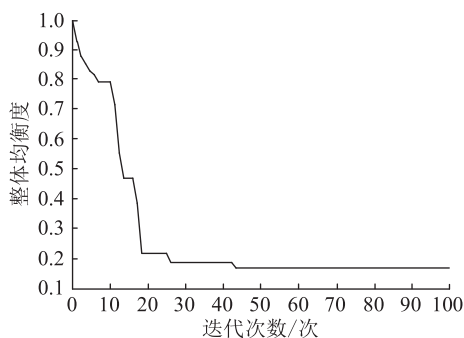


图10 迭代曲线  
Fig.10 Iterative curve

各优选方案的接入位置及光伏接入容量如表 1 所示。优选后各方案的指标对比如表 2 所示,方案 2 以电压为单目标,电压指标较未接入光伏时下降至 0.288%,为最优解;方案 3 以网损为单目标,网损指标下降至 0.204%,为最优解;方案 4 以多目标进行优选时,得到了最优的整体均衡度,各项结果虽然不是最优,但可以使电压和网损指标同时得到改善,且稳定性指标没有大幅度上升。该优选方案验证了所提方法的可行性和有效性。

表 1 德 31 德都北光伏位置容量的优选方案  
Table 1 Optimal schemes of photovoltaic location and capacity in line De 31 Dedubei

参数	方案			
	1	2	3	4
接入位置一		4	2	2
容量一/MW		1.8	0.3	1.1
接入位置二		12	10	11
容量二/MW		0.8	1.2	1.8
接入位置三		17	16	20
容量三/MW		1.4	1.4	0.6

注:各方案接入位置所示数字为光伏接入的台区编号。

表 2 4 种优选方案的评价参数  
Table 2 Evaluation parameters for four optimal schemes %

参数	方案			
	1	2	3	4
电压指标	2.923	0.288	0.828	0.472
网损指标	2.406	0.786	0.204	0.472
稳定性指标	2.838	4.252	3.843	3.167

## 4 结语

文中提出计及综合因素的光伏接入配电网优选方案。将台区电压、线路损耗和电压稳定性作为决策子目标,利用基于交互式决策数学模型的多目标优化方法对配电网光伏安装位置和容量进行选择。研究发现光伏接入配电网会对系统的电压质量、经济指标和安全性能产生影响。据此,文中建立了光伏接入的优选模型,提出了一种基于交互式决策数学模型的多目标优化方法。

通过对上海市北电网德 31 德都北馈线进行分析,研究了接入光伏对配电网关键指标的影响,并求解出光伏接入的最优选方案,为光伏发电项目的规划设计提供了理论依据。后续将以 35 kV 光伏电站为目标,研究其对系统的影响。

### 参考文献:

[1] 叶斌,王绪利,马静,等. 新电改下考虑微网和多元负荷的配

网效益评价研究[J]. 电力工程技术,2019,38(3):108-114.

YE Bin,WANG Xuli,MA Jing,et al. Benefit evaluation of distribution network considering microgrid and multiple loads under new electricity reform[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(3):108-114.

[2] 刘博,柯德平,李鹏,等. 低压配电台区分布式光伏发电功率辨识方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(19):111-116,123. LIU Bo,KE Deping,LI Peng,et al. Identification method of distributed photovoltaic power in low-voltage distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(19):111-116,123.

[3] 高辉,徐晴,欧阳曾恺,等. 含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J]. 电力工程技术,2018,37(4):21-26.

GAO Hui,XU Qing,OUYANG Zengkai,et al. Analysis of the optimal control strategy for source network load with multi-type distributed power source[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(4):21-26.

[4] 高国梁. 分布式电源接入后的配电网降损及规划问题研究[D]. 济南:山东大学,2019.

GAO Guoliang. Research on loss reduction and planning of distribution network under distributed generation access [D]. Jinan:Shandong University,2019.

[5] 赵政嘉,李海波,赵宇明,等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(12):50-61.

ZHAO Zhengjia,LI Haibo,ZHAO Yuming,et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration [J]. Power System Protection and Control,2020,48(12):50-61.

[6] 李建军,杜松怀,杨德昌. 集中光伏电源接入对低压配电网电压的影响[J]. 智慧电力,2020,48(4):21-27.

LI Jianjun,DU Songhuai,YANG Dechang. Influence of concentrated photovoltaic power supply access on voltage of low voltage distribution network[J]. Smart Power,2020,48(4):21-27.

[7] 孙玉伟,刘亚东,方健,等. 分布式光伏接入对配电网线路故障定位的影响分析[J]. 智慧电力,2020,48(9):102-107.

SUN Yuwei,LIU Yadong,FANG Jian,et al. Influence of distributed photovoltaic access on fault location in distribution network lines[J]. Smart Power,2020,48(9):102-107.

[8] 胡雪凯,张乾,胡文平,等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(17):75-82.

HU Xuekai,ZHANG Qian,HU Wenping,et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing[J]. Power System Protection and Control,2019,47(17):75-82.

[9] 潘宇. 计及损耗及电压水平的分布式光-储系统容量配置及经济性研究[D]. 吉林:东北电力大学,2017.

PAN Yu. Research on capacity allocation and economy of distributed photovoltaic-energy storage system considering power loss and voltagelevel [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2017.

[10] 李晓玉. 含分布式电源的配电网重构研究[D]. 成都:西

- 南交通大学,2016.
- LI Xiaoyu. Research on reconfiguration of distribution network with distributed generation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2016.
- [11] KHATOD D K, PANT V, SHARMA J. Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):683-695.
- [12] 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.
- [13] 李升,姜程程,赵之瑜,等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(8):67-72.
- LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, et al. Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control,2017,45(8):67-72.
- [14] 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.
- [15] 贤燕华,王世强,江明轩. 基于H $\infty$ 控制的并网逆变器输出端扰动抑制[J]. 控制工程,2019,26(9):1661-1666.
- XIAN Yanhua, WANG Shiqiang, JIANG Mingxuan. Disturbance rejection at the output of Grid-connected inverter based on H-infinity control[J]. Control Engineering of China,2019,26(9):1661-1666.
- [16] 朱玥,顾洁,孟璐. 基于EMD-LSTM的光伏发电预测模型[J]. 电力工程技术,2020,39(2):51-58.
- ZHU Yue, GU Jie, MENG Lu. Photovoltaic power generation prediction model based on EMD-LSTM[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(2):51-58.
- [17] 龚向阳,周开河,徐孝忠,等. 含分布式光伏的配电网电压分区协调控制方案[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(5):127-133.
- GONG Xiangyang, ZHOU Kaihe, XU Xiaozhong, et al. Voltage partition coordinated control scheme for distribution network with distributed PV[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(5):127-133.
- [18] 杨清,高雁. 基于PSASP的潮流计算及其应用[J]. 电测与仪表,2010,47(S2):78-81.
- YANG Qing, GAO Yan. The application and power flow calculation of PSASP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2010,47(S2):78-81.

作者简介:



许鸣吉

许鸣吉(1993),男,硕士,工程师,从事电力规划与调度运行工作(E-mail: xumingji1993@126.com);

沈磊(1988),男,硕士,高级工程师,从事电力规划与调度工作;

李胜(1976),男,博士,副教授,研究方向为人工智能和工业控制。

### Optimization of photovoltaic access distribution network considering comprehensive factors

XU Mingji<sup>1</sup>, SHEN Lei<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>2</sup>, GUO Jian<sup>2</sup>, LIU Jiabao<sup>1</sup>

(1. State Grid Shibe Power Supply Company of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200072, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The access of photovoltaics changes the structure and power flow of distribution network, thus collapsing traditional pattern by single-phase power supply. The change of system flow inevitably affects the voltage quality, economic indicators and safety of distribution network. Considering the impacts that photovoltaic access to distribution network brings, a multi-objective optimization method based on interactive decision mathematical model is proposed. Firstly, it takes into account the comprehensive factors including different access capacities, dense and decentralized access of photovoltaic which affect the voltage and line loss. Then, the optimal model of photovoltaic access is established. Finally, from the impact of access to photovoltaic on the key indicators of distribution network, the most optimal solution for photovoltaic access is found. By the analysis of De 31 Dedubei, the proposed multi-objective optimization method provides a theoretical basis for the planning and design of photovoltaic power generation projects.

**Keywords:** photovoltaic; distribution network; power quality; economic indicator; safety performance; multi-objective interactive model

(编辑 李栋)