

DOI: 10.7667/PSPC180186

# 计及电压稳定性评估的配电网 DG 选址定容的研究

孙顺祥, 李晓明, 刘振盛, 史文超, 郝超超

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 近些年配电网设备的运行越来越接近极限状态, 使配网中也开始出现电压稳定问题。针对目前 DG 接入配网的研究大多未考虑电压稳定的因素, 提出一种计及电压稳定性评估的配电网 DG 选址定容决策方法。通过对传统电压稳定指标进行改进, 将电力系统允许的电压运行范围纳入稳定评估指标中。在综合考虑电压稳定性、系统网损和电流裕度指标的基础上, 采用(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)多目标决策方法对 DG 接入配电网的位置和容量进行决策。通过两节点系统算例与传统电压稳定指标的对比, 验证了改进的电压稳定评估方法的合理性。通过 IEEE33 节点系统算例分析, 验证了 DG 选址定容策略的可行性和有效性。

**关键词:** 配电网; 电压稳定性; 分布式电源; 逼近理想解排序法

## Research on locating and sizing of DG in the distribution network considering voltage stability assessment

SUN Shunxiang, LI Xiaoming, LIU Zhensheng, SHI Wenchao, HAO Chaochao  
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In recent years, the equipment operation of the distribution network has been getting close to the limit state. Therefore, the problem of voltage stability has appeared in the distribution network gradually. In view of the factor that voltage stability is not considered in most current researchers on DG access to distribution network, a method for determining the location and capacity of DG in the distribution network is proposed, which takes voltage stability problem into account. By improving the traditional voltage stability index, the allowed voltage range of power system is included in the stability assessment index. Based on the comprehensive consideration of voltage stability, network power losses and current margin index, this paper uses TOPSIS method to decide the location and capacity of DG in the distribution network. Compared with the traditional voltage stability index, the rationality of the improved voltage stability evaluation method is verified through the simulation on two-node system example. And the feasibility and effectiveness of DG location and capacity determination strategy are verified through the analysis of IEEE33 node system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

**Key words:** distribution network; voltage stability; distributed generator; TOPSIS

## 0 引言

随着全球范围内的能源危机、电力危机与大面积停电事故的发生, 暴露出了集中发电的电力系统的弊端, 现如今国内外研究的热点已转移到分布式电源上来<sup>[1-2]</sup>。分布式电源(Distributed Generator, DG)是指将发电系统以小规模(发电功率为数千瓦至 50 MW 小型模块式)、分散式的方式布置在用户的附近, 可独立输出电能的系统<sup>[3-5]</sup>。当配电网中接入

DG 时, 能够通过 DG 降低线路的传输功率, 从而减小配电网损耗和提升电压<sup>[6]</sup>。然而, 若 DG 接入位置或容量不合理, 不但会造成资金浪费, 还会恶化配电网技术指标<sup>[7-9]</sup>。因此, 全面合理地考虑 DG 选址和定容问题, 对配电网的电能质量及安全可靠性有重要意义。

各国学者在 DG 选址定容方面已经进行了很多研究。文献[7]对负荷和分布式电源的典型时序特性进行分析, 以配电网网损、停电损失为目标提出 DG 选址定容规划模型, 给出了场景和场景权重的确定方法。文献[8]提出了一种计及信息不确定性的 DG

优化配置模型与算法, 以投资成本、收益、网络损耗等为优化目标进行求解。文献[10]提出了一种改进多目标微分进化算法, 综合考虑网损、电压质量和电流质量建立了多目标决策模型。文献[11]采用损耗灵敏度因子对 DG 进行最优布置, 建立以减小系统网损为目标的 DG 容量配置优化模型。

目前针对 DG 选址定容的研究大多未将电压稳定性纳入多目标决策模型中。分布式电源在接入配电网后, 将对配电系统的电压稳定水平产生影响<sup>[12]</sup>。文献[13]分析了各种分布式发电设备在配电网中的安装位置对静态电压稳定性的影响。文献[14]推导了负荷节点电压与 DG 渗透率的关系, 将扩展线路电压稳定指标应用于含 DG 的电网电压稳定分析中。文献[15]考虑 DG 的接入数量、接入位置、接入容量等因素, 对比测试了  $L$  指标研究对静态电压稳定性的影响。

针对已有研究的不足, 本文综合静态电压稳定性、网络损耗及电流质量指标, 建立了配电网 DG 选址定容的多目标决策模型。首先, 对传统的基于潮流解存在性的电压稳定指标进行改进, 将电力系统运行的电压允许上下限纳入评估方法中, 进而提出改进的配电网电压稳定评估指标。同时计及电压稳定、有功网损和电流裕度三方面, 采用(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)法计算 DG 接入配电网位置、容量的最优方案。本文通过单支路两节点系统验证了所提电压稳定指标的合理性, 并以 IEEE33 节点配电网为例, 对所提出的 DG 选址定容方法进行了验证。

## 1 配电网静态电压稳定指标

在静态电压稳定分析中, 现阶段应用较广的指标多以电网潮流方程为基础, 包括雅可比矩阵奇异程度<sup>[16]</sup>、潮流方程有解条件<sup>[17-18]</sup>、等效电气距离<sup>[19]</sup>等定义的评估指标。对基于潮流解存在性的评估方法, 通常以潮流方程判别式大于 0 作为电压稳定的识别条件。但根据《电力系统安全稳定导则》对电压稳定的定义: 电压稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后, 系统电压能够保持或恢复到允许范围内, 不发生电压崩溃的能力。因此, 传统的基于潮流解存在性的评估方法仅考虑了电压解的存在性, 并不能确定所求解的电压在允许范围内。《供电营业规则》规定, 在电力系统正常运行条件下, 10 kV 及以下三相供电系统中用户受电端的电压允许偏差不得超过额定值的  $\pm 7\%$ ; 对非正常状况下, 电压最大允许偏差不得超过额定值的  $\pm 10\%$ 。对此, 本文提出了一种考虑电压解允许范围的配电网静态电压

稳定评估指标。

对于图 1 所示的配电网简单支路模型, 送端节点为  $i$ , 受端节点为  $j$ ,  $U_i \angle \delta_i$  和  $U_j \angle \delta_j$  分别表示两节点电压,  $P_i + jQ_i$  和  $P_j + jQ_j$  分别表示两节点送出的潮流功率, 线路  $l$  的阻抗为  $R_l + jX_l$ 。

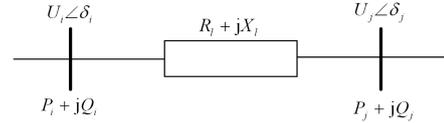


图 1 配电网简单支路模型

Fig. 1 Simplified branch model of a distribution network

根据复功率的定义, 支路电流  $I_l$  可表示为

$$I_l = \frac{\dot{S}_j^*}{\dot{U}_j} = \frac{P_j - jQ_j}{U_j \angle -\delta_j} \quad (1)$$

根据阻抗元件 VCR 特性, 支路电流  $I_l$  可表示为

$$I_l = \frac{\dot{U}_l}{Z_l} = \frac{U_i \angle \delta_i - U_j \angle \delta_j}{R_l + jX_l} \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)并按实虚部分别展开, 得

$$\begin{cases} \text{Re}: P_j R_l + Q_j X_l = U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j) - U_j^2 \\ \text{Im}: P_j X_l - Q_j R_l = U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j) \end{cases} \quad (3)$$

消去式(3)中的  $(\delta_i - \delta_j)$  项, 得

$$\begin{aligned} U_j^4 + (2P_j R_l + 2Q_j X_l - U_i^2) U_j^2 + \\ (R_l^2 + X_l^2)(P_j^2 + Q_j^2) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

传统的基于潮流解存在性的电压稳定指标根据式(4)根的判别式大于 0 来判断电压存在实数解, 进而评估电压稳定性。但该方法只确定解的存在性, 而不能指出所得解是否在允许范围内, 因此没有恰当地反映系统电压能够保持或恢复到允许范围内, 不发生电压崩溃的能力。

本文考虑将电力系统运行的电压允许范围  $U_j \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  纳入电压稳定评估指标中, 设  $x_j = U_j^2$ , 构造函数  $f(x_j)$  为

$$f(x_j) = x_j^2 + b_j x_j + c_j \quad (5)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} b_j = (2P_j R_l + 2Q_j X_l - U_i^2) \\ c_j = (R_l^2 + X_l^2)(P_j^2 + Q_j^2) \end{cases}。$$

式(4)双二次方程中电压解的平方即为式(5)二次函数的根, 其对称轴为  $x_{sj} = -\frac{b_j}{2}$ 。

考虑式(5)的二次函数开口向上, 且  $c_j > 0$ , 由二次函数图象可得,  $x_j$  在  $[\lambda_{\min}^2, \lambda_{\max}^2]$  内有实数根的条件为

$$\begin{cases} f(\lambda_{\min}^2)f(\lambda_{\max}^2) \leq 0 & (0 < x_{sj} \leq \lambda_{\min}^2) \\ f(x_{sj})f(\lambda') \leq 0 & (\lambda_{\min}^2 < x_{sj} \leq \lambda_{\max}^2) \\ f(\lambda_{\min}^2)f(\lambda_{\max}^2) \leq 0 & (x_{sj} > \lambda_{\max}^2) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中, } \lambda' = \begin{cases} \lambda_{\min}^2 & (x_{sj} \geq \frac{1}{2}(\lambda_{\min}^2 + \lambda_{\max}^2)) \\ \lambda_{\max}^2 & (x_{sj} < \frac{1}{2}(\lambda_{\min}^2 + \lambda_{\max}^2)) \end{cases}$$

因此, 由条件式(6)可以定义节点电压稳定指标  $L_j$  为

$$L_j = \begin{cases} -f(\lambda_{\min}^2)f(\lambda_{\max}^2) & (0 < x_{sj} \leq \lambda_{\min}^2) \\ -f(x_{sj})f(\lambda') & (\lambda_{\min}^2 < x_{sj} \leq \lambda_{\max}^2) \\ -f(\lambda_{\min}^2)f(\lambda_{\max}^2) & (x_{sj} > \lambda_{\max}^2) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当  $L_j > 0$  时, 式(4)在  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  内有实数解, 节点电压稳定; 当  $L_j < 0$  时, 节点电压不稳定; 当  $L_j = 0$  时, 该节点处于临界稳定状态, 此时配电网系统状态的微小变化将可能导致无法满足电力系统运行要求。因此, 可将节点电压稳定指标  $L_j$  视为一种特殊的裕度指标, 在大于 0 的情况下, 其值越大, 则该节点电压稳定性越好。

对于具有  $n$  个节点的配电网, 定义整个配电网的电压稳定指标  $L$  为

$$L = \min_{j \in [1, n]} (L_j) \quad (8)$$

式(8)以系统电压稳定裕度最小节点的电压稳定指标作为全系统评估指标,  $L$  的值越大, 则整个系统的电压稳定裕度越大, 表明配电网电压越稳定。

## 2 配电网 DG 选址定容决策

### 2.1 子目标函数

本文对配电网 DG 选址定容的研究根据电压稳定裕度、有功网损和电流裕度三个子目标指标函数, 采用 TOPSIS 方法综合评价最优解。

#### (1) 电压稳定裕度指标

合理的 DG 接入位置和容量将改善整个配电网的电压分布, 提升配电网的电压稳定裕度。以第 1 节中的电压稳定指标  $L$  作为评价指标, 即

$$L = \min_{j \in [1, n]} (L_j) \quad (9)$$

#### (2) 有功网损指标

图 1 的配电网支路模型中, 其支路有功损耗为

$$P_l = P_i - P_j \quad (10)$$

计算整个配电网的有功网损, 可以表示为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{l=1}^N P_l \quad (11)$$

式中,  $N$  表示配电网线路总数。

#### (3) 电流裕度指标<sup>[10]</sup>

配电网接入 DG 后, 对原系统中各条线路的电流可能起到增大或减小的作用, 因此需要对线路电流水平进行评价。以线路热稳定裕度作为电流裕度指标, 表示为

$$I_c = \max_{l=1}^N \frac{I_l}{I_{l\max}} \quad (12)$$

式中:  $I_l$  表示第  $l$  条线路的电流;  $I_{l\max}$  表示第  $l$  条线路的最大电流。

针对以上三种子目标函数, DG 接入配电网后的优化方向应使电压稳定裕度增大、有功网损指标减小、电流裕度指标减小。然而多目标之间无法同时达到理想情况, 因此本文采用 TOPSIS 方法进行多目标决策, 求解各方案与理想目标的相似性, 从而进行顺序优选, 寻找最优解。

在多目标决策过程中, 需要满足配电网功率平衡约束、节点电压与线路传输容量约束、DG 的接入容量和位置约束条件。

### 2.2 TOPSIS 多目标决策

TOPSIS 法也称逼近理想解排序法, 其基本原理为通过计算有限个评价对象与正理想解和负理想解之间的距离对对象进行相对优劣的评价<sup>[20]</sup>。其中, 正理想解为待评价对象中指标的最优值, 负理想解为待评价对象中指标的最差值。

采用 TOPSIS 方法对配电网 DG 进行选址定容决策的步骤如下。

Step1 根据配电网 DG 可接入节点位置和容量确定各评价对象。设 DG 安装数量为  $p$  个, 可接入的负荷节点位置有  $n$  个, 可接入容量  $m$  种, 则可确定  $(n \times m)^p$  个 DG 接入方案, 即  $(n \times m)^p$  个评价对象。

Step2 根据  $(n \times m)^p$  个评价对象对应的 3 种评价指标(电压稳定裕度、有功网损、电流裕度)计算结果, 构造多目标决策矩阵  $\mathbf{X}_{(nm)^p \times 3}$ 。

Step3 对于多目标决策矩阵, 统一各项指标的单调性。对于配电网而言, DG 接入的优化方向应为电压稳定裕度指标增大、有功网损和电流裕度指标减小。本文采用高优指标, 即指标数值越大评价对象越优。故对  $\mathbf{X}_{(nm)^p \times 3}$  的有功网损和电流裕度列分量中各元素取倒数, 形成新的决策矩阵  $\mathbf{X}'_{(nm)^p \times 3}$ 。

Step4 计算规范化决策矩阵  $\mathbf{A}_{(nm)^p \times 3}$ 。对  $\mathbf{X}'_{(nm)^p \times 3}$  中各元素进行向量规范化处理, 即

$$a_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{(nm)^p} x_{ij}^2}} \quad (13)$$

Step5 计算权重规范化决策矩阵  $Z_{(nm)^p \times 3}$ 。对各评价指标设置权重  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ , 计算权重规范化矩阵中各元素为

$$z_{ij} = \omega_j a_{ij} \quad (14)$$

Step6 确定评价对象的正理想解和负理想解分别为  $Z^+$  和  $Z^-$ 。由于本文采用高优型指标, 故有

$$\begin{cases} Z^+ = (z_{i1}^+, z_{i2}^+, z_{i3}^+) = (\max_i z_{i1}, \max_i z_{i2}, \max_i z_{i3}) \\ Z^- = (z_{i1}^-, z_{i2}^-, z_{i3}^-) = (\min_i z_{i1}, \min_i z_{i2}, \min_i z_{i3}) \end{cases} \quad (15)$$

Step7 计算各评价对象的距离尺度  $D_i^+$  和  $D_i^-$ , 即每个对象到正理想解和负理想解的距离。本文采用欧氏距离计算, 为

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (z_{ij} - z_{ij}^+)^2} \quad (i=1, 2, \dots, (nm)^p) \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (z_{ij} - z_{ij}^-)^2} \quad (i=1, 2, \dots, (nm)^p) \end{cases} \quad (16)$$

Step8 计算各评价对象的理想解贴近度  $C_i$  为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (i=1, 2, \dots, (nm)^p) \quad (17)$$

Step9 根据各评价对象的理想解贴近度进行排序, 选取  $C_i$  的最大值为最优方案, 即 DG 的最佳接入位置和容量。

### 3 算例分析

本文提出改进的电压稳定评估指标, 并将电压稳定性应用于配电网的 DG 选址定容中, 形成多目标决策模型。为了对所提方法进行验证, 采用两节点系统验证电压稳定指标的正确性, 并采用 IEEE33 节点配电网对 DG 选址定容进行算例分析。

#### 3.1 两节点系统验证分析

以图 2 所示的单支路两节点系统验证所提电压稳定指标的合理性。仿真过程中令负荷的增长方式包括两种: 方式一为有功负荷增大, 无功负荷不变; 方式二为有功、无功负荷同比例增大。计算本文的

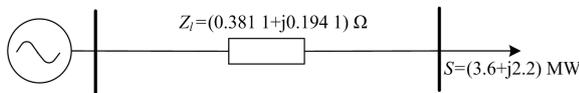


图 2 两节点系统模型

Fig. 2 Two-node system model

电压稳定指标时, 电压允许范围  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  设置为  $[0.9 \text{ p.u.}, 1.1 \text{ p.u.}]$ 。随着负荷的增长, 本文的电压稳定指标  $L_j$  与文献[13]中基于潮流解存在性的电压稳定指标  $L'_j$  的变化如图 3 所示。其中,  $L'_j$  指标以潮流方程根的判别式大于 0 推导得出, 指标计算如式(18)所示, 其稳定极限值为 1。

$$L'_j = \frac{4}{U_i^4} [(X_i P_j - R_i Q_j)^2 + (X_i Q_j + R_i P_j) U_i^2] \quad (18)$$

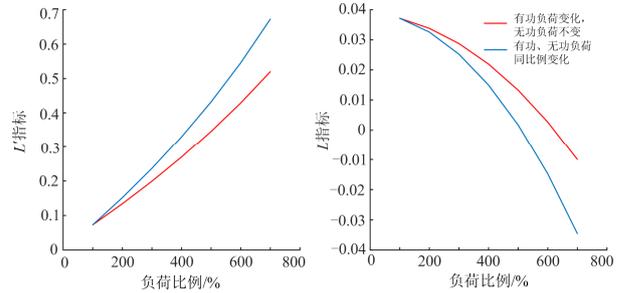


图 3 不同负荷增长方式下电压稳定指标的变化

Fig. 3 Variation of voltage stability index under different load increasing modes

由图 3 可知, 在两种负荷变化方式下, 随着负荷的增长, 文献[13]中的电压稳定指标  $L'_j$  向 1 方向不断增大, 而本文的电压稳定指标  $L_j$  向 0 方向不断减小, 二者均朝着电压不稳定的方向发展, 且速度随负荷的增长不断加快。根据潮流结果, 在电压达到 0.9 p.u. 时, 方式一的负荷增长到 620%, 方式二的负荷增长到 510%。由图 3 可知, 这两种情况下文献[13]中的  $L'_j$  指标分别为 0.446 6 和 0.443 1, 由于  $L'_j$  指标的电压稳定极限指标为 1, 因此根据其指标判断此时系统处于电压稳定状态。而本文考虑到电力系统允许的电压运行范围, 达到 0.9 p.u. 时认为已经达到了稳定极限, 图 3 的结果也显示出这两种情况下本文的  $L_j$  指标刚好为 0, 表明已经达到稳定极限状态。因此, 本文所推导的  $L_j$  指标具有合理性。

#### 3.2 IEEE33 节点配电网分析

对 DG 选址定容的决策分析采用如图 4 所示的 IEEE33 节点配电网模型, 包含 32 条支路, 首端节点 1 的基准电压为 12.66 kV, 基准功率为 100 MVA。电压允许范围  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  仍取  $[0.9 \text{ p.u.}, 1.1 \text{ p.u.}]$ , 各条线路的最大电流取 0.4 kA。分别在配电网中各负荷节点设置不同容量的 DG, 仿真各种选址定容方式下系统电压稳定指标的变化情况, 结果如图 5 所示。

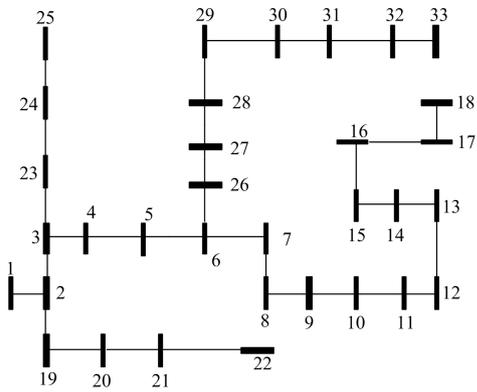


图 4 IEEE33 节点配电网

Fig. 4 IEEE 33-bus distribution network

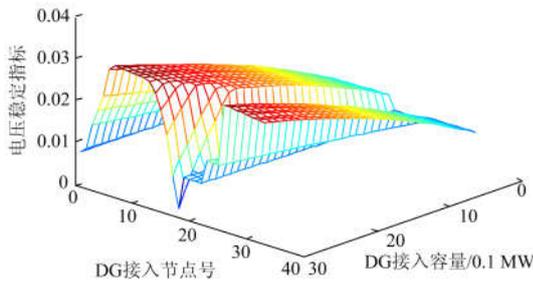


图 5 系统电压稳定指标随 DG 安装位置和容量的变化  
Fig. 5 Change of the system voltage stability index under the location and capacity of DG

由图 5 可知，在一定的 DG 接入容量范围内，系统电压稳定指标随 DG 容量的增长而增大，即系统的电压稳定性在提升。但容量超出一定范围后，在部分节点接入 DG 时电压稳定性反而降低。同样地，利用潮流计算结果观察各种选址定容方式下的系统网损和电流指标的变化情况，结果如图 6 所示。

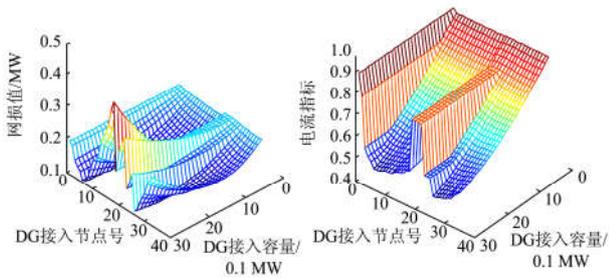


图 6 系统网损和电流指标随 DG 安装位置和容量的变化  
Fig. 6 Change of the network power losses and current index under the location and capacity of DG

由图 6 可知，系统网损和电流指标也都只在一定的 DG 接入容量范围内有减小的趋势。结合图 5 分析，电压稳定、网损和电流指标三个目标无法同时达到理想情况，因此采用 TOPSIS 方法进行多目标决策，确定 DG 的最优接入位置和容量。

在本算例中，设置 DG 的安装数量为 2 个，可接入的负荷节点编号为 2—33，可接入的 DG 容量包括 5 种：0.3 MVA、0.6 MVA、0.9 MVA、1.2 MVA 和 1.5 MVA，功率因数均设置为 0.9，因此可以确定 25 600 种 DG 接入方案，即 25 600 个评价对象。各评价指标的权重设置均相等。针对 2.1 节中的三个子目标指标，综合计算评价对象的正理想解向量和负理想解向量分别为  $Z^+ = (0.009\ 9, 0.015\ 6, 0.011\ 3)$  和  $Z^- = (-0.014\ 4, 0.001\ 7, 0.004\ 1)$ 。

对于每个评价对象，计算其到正理想解与负理想解的距离，并得到各评价对象的理想解贴近度  $C_i$ ，25 600 个评价对象的理想解贴近度如图 7 所示。

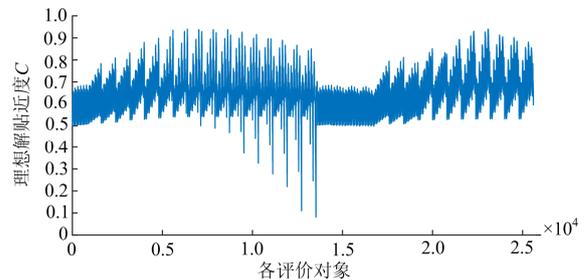


图 7 各评价对象的理想解贴近度

Fig. 7 Ideal solution closeness of each evaluation object

由 TOPSIS 法可知，理想解贴近度取值为 0~1，越接近 1 的评价对象越接近最优水平。因此，根据理想解贴近度对评价对象进行优劣排序，图 7 结果表明，DG 最佳安装位置分别为节点 7 和节点 28，对应的安装容量分别为 1.2 MVA 和 1.5 MVA，此时的理想解贴近度为 0.94。为了对比分析决策结果，表 1 列出了几种 DG 安装方案的各子目标值。

表 1 几种 DG 安装方案对比

Table 1 Comparison of several DG installation programs

方案	DG 安装位置	DG 安装容量/MVA	理想解贴近度	电压稳定指标	网损指标/MW	电流裕度指标
1	无	—	—	0.008 4	0.202 7	0.910 9
2	7	1.2	0.940 0	0.032 6	0.051 1	0.349 3
3	28	1.5	0.867 6	0.027 3	0.063 1	0.410 2
4	5	0.9	0.792 0	0.024 5	0.081 1	0.471 9
5	8	1.2	0.696 4	0.020 6	0.111 2	0.613 1
6	15	0.9	0.578 1	0.012 2	0.184 1	0.686 3
7	20	1.5	0.625 5	0.012 7	0.189 6	0.579 0
8	3	1.2	0.675 6	0.030 9	0.064 8	0.296 2
	22	1.5				
	5	1.5				
	8	1.5				

根据表 1 中的结果, 与未安装 DG 时的情况相比, DG 接入配电网后对系统的电压稳定性、网损和电流裕度均有改善作用。对比理想解贴程度最大的方案 2 和其他几种 DG 接入方案, 可以发现方案 2 的电压稳定、网损和电流指标基本都更优。而对比方案 2 和方案 8, 虽然方案 8 的电流裕度指标更好, 但其电压稳定性和网损指标都更差, 可以判断方案 2 优于方案 8, 这也正是 TOPSIS 多目标决策的结果, 因此可以反映出该方法的合理性。

#### 4 结论

本文提出计及电压稳定性评估的配电网 DG 选址定容的决策方案, 通过对传统静态电压稳定指标进行改进, 将其与有功网损和电流裕度作为三个决策子目标, 利用 TOPSIS 多目标决策方法对配电网安装 DG 的位置和容量进行选择。本文研究可得出以下结论。

1) 提出了改进的静态电压稳定的评估方法。针对传统的基于潮流解存在性的电压稳定性评估, 将电力系统运行所允许的电压范围纳入评估的考虑之中, 进而定义新的电压稳定裕度指标。

2) 以两节点系统为例, 通过负荷变化观察电压稳定指标的变化, 与传统的基于潮流解存在性的稳定指标进行对比, 验证了新指标的合理性。

3) 提出了基于 TOPSIS 多目标决策的配电网 DG 选址定容方法。以改进的电压稳定性、有功网损和电流裕度为决策子目标, 利用 TOPSIS 方法进行顺序优选, 寻找最优解。

4) 以 IEEE33 节点系统为例, 对 DG 选址定容决策进行验证。将决策结果与其他 DG 安装方案对比分析, 证明所提决策方案的合理性和有效性。

#### 参考文献

- [1] MOHANMAD A A, JAMSHID A, MOSTAFA B B, et al. Convex models for optimal utility-based distributed generation allocation in radial distribution systems[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 99: 1-12.
- [2] ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [3] 吴素农. 分布式电源控制与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 彭光斌, 詹红霞, 黄培东, 等. 基于自适应粒子群算法优化 DG 的配网静态电压稳定性提高策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 100-106.
- [5] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.
- [6] MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.
- [7] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 23-28.
- [8] ZHANG Limei, TANG Wei, WANG Shaolin, et al. Distributed generators planning considering benefits for distribution power company and independent power suppliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 23-28.
- [9] 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.
- [10] LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, 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.
- [11] 韩亮, 王守相, 赵歌. 基于区间 TOPSIS 与遗传算法混合的分布式电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 37-42.
- [12] HAN Liang, WANG Shouxiang, ZHAO Ge. Optimal planning of distributed generators based on combination of interval TOPSIS method and genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 37-42.
- [13] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.
- [14] WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [15] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
- [16] XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 115-121.
- [17] 高艺文, 刘俊勇, 雷成, 等. 考虑配电网结构变化的 DG 规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 40-46.

- GAO Yiwen, LIU Junyong, LEI Cheng, et al. DG planning considering the variation of the distribution network structure[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 40-46.
- [12] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.
- [13] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30. CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [14] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13. LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaojin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [15] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125. ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [16] 衣涛, 王承民, 谢宁, 等. 电力系统的多重(维)鞍结分岔点及其特征分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 145-150. YI Tao, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Power system multiple saddle-node bifurcation point and its characteristic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 145-150.
- [17] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48. ZHANG Qian, LIAO Qingfeng, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [18] 董雷, 张昭, 蒲天娇, 等. 基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6. DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [19] CHEBBO A M, IRVING M R, STERLING M J H. Voltage collapse proximity indicator: behavior and implications[J]. IEE Proceedings-C: Generation, Transmission and Distribution, 1992, 139(3): 241-252.
- [20] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-03-28

作者简介:

孙顺祥(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 463966814@qq.com

李晓明(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电能质量、智能电网等。E-mail: xmli@whu.edu.cn

(编辑 许威)