

电压稳定极限曲面法向量在分布式电源选址中的应用

邓大上, 房鑫炎

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 随着分布式能源在电网中比重加大, 合理地选择其安装地点对提高电力系统电压稳定性有重要意义。针对传统的失稳模式参与因子对极限诱导分岔失效的缺陷, 提出了一种基于节点注入功率空间的电压稳定极限曲面法向量指标用于分布式电源选址。通过理论分析证明了该指标指导选址的合理性。在 IEEE39 节点系统测试结果验证了其正确性。与传统方法相比, 法向量指标可以较好地处理鞍节点分岔和极限诱导分岔两种主要的失稳模式, 具有更大的适用范围。

关键词: 电压稳定极限曲面; 节点注入功率空间; 鞍节点分岔; 极限诱导分岔; 分布式电源选址; 电压稳定裕度

Application of normal vector of voltage stability limit surface in distributed generation allocation

DENG Dashang, FANG Xinyan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increase of distributed generation integrated, proper allocation is important to enhance voltage stability of power system. To settle down the drawback of traditional participation factor based allocation method, a normal vector index based on voltage stability limit surface is proposed. The rationality of this index is proved at first. Numerical simulation of IEEE 39 system demonstrates the validity of the proposed method. Compared to the traditional index, normal vector index has a wider range of application because it can deal with the voltage stability critical point of saddle node bifurcation and limit induced bifurcation.

Key words: voltage stability limit surface; injection power space; saddle node bifurcation; limit induced bifurcation; distributed generation allocation; voltage stability margin

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0057-06

0 引言

随着新能源在电网中比重越来越大, 其对电力系统安全稳定性的影响已经不可忽略^[1-3]。合理选择分布式能源的接入位置可以有效提高系统的安全性, 大幅减少不必要的成本; 反之则有可能会恶化运行环境, 增加运行费用^[4-6]。传统的分布式电源选址指标包括灵敏度^[7-8]和参与因子^[9-10]等方法。灵敏度法的思路是通过计算当前运行点处系统安全稳定指标对分布式能源输出功率的灵敏度, 并以其为指标选取灵敏度较大的节点安装分布式电源。由于电力系统的非线性, 当前点的灵敏度无法表征系统失稳点处的特性, 因此灵敏度方法的准确性差。

文献[10]提出基于电压极限运行点参与因子的选址方法, 该方法目前已经得到应用。该方法利用鞍节失稳点^[11](Saddle Node Bifurcation, SNB)处雅

可比矩阵奇异的性质, 定义零特征值对应模式为失稳模式, 并计算各个模态对该模式的“贡献”, 从而计算失稳模式参与因子。但对于系统中变量越限而导致的极限诱导分岔^[12](Limit Induced Bifurcation, LIB), 一般情况下此时潮流雅可比矩阵不奇异, 并无对应的失稳模式, 此时参与因子的有效性无法保证。

为此, 本文提出了基于电压稳定极限运行曲面(以下称极限曲面)的法向量指标, 该指标利用系统失稳点处法向量的大小来表征各个节点变量对系统失稳点的影响。从而避免了参与因子在 LIB 情况下失效的缺陷。本文首先对该指标进行详细的数学推导, 从理论上证明节点的法向量指标的有效性。最后在算例分析中验证了该指标的正确性。

1 失稳模式参与因子

假设在电压失稳临界点处, 系统潮流方程为

$$\begin{cases} f^P(x) - P = 0 \\ f^Q(x) - Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： P 代表 PV 和 PQ 节点的有功注入功率向量； Q 为 PQ 节点无功注入功率向量； x 代表电力系统的状态变量，包括节点电压的幅值和相角，可表示为 $x = [\theta^T V^T]^T$ ，其中 θ, V 分别为节点电压相角和幅值；第一组方程代表 PV 节点和 PQ 节点的有功平衡方程；第二组方程代表 PQ 节点的无功平衡方程。

对式(1)等式两边微分，得式(2)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0^P & f_V^P \\ f_0^Q & f_V^Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

约去注入无功功率和节点电压相关项，得

$$\Delta P = (f_0^P - f_V^P (f_V^Q)^{-1} f_0^Q) \Delta \theta = J_{p0} \Delta \theta \quad (3)$$

式中， J_{p0} 为约化后的有功相角关系矩阵。对 J_{p0} 进行特征值分解，可得节点 k 的有功相角灵敏度为

$$\frac{\Delta \theta_k}{\Delta P_k} = \sum_i \frac{u_{ik} w_{ik}}{\lambda_i} = \sum_i \frac{p_{ki}}{\lambda_i} \quad (4)$$

式中： λ_i 为 J_{p0} 的第 i 个特征值； u_{ik}, w_{ik} 分别为特征值 λ_i 对应的右特征向量和左特征向量的第 k 个元素； p_{ki} 为节点 k 的模式 i 参与因子。由该式可见，特征值的模值越小，其对应模式对系统的作用越强。

对于 SNB 型电压稳定临界点， J_{p0} 存在零特征值，因此，此时电压失稳行为主要由零特征值对应模式表征，称为失稳模式。参与因子大的节点的注入功率对电压失稳的贡献越大，而选择这些节点作为分布式能源的备选节点可以有效地提高系统的静态电压稳定性。而对于 LIB 型电压稳定临界点， J_{p0} 没有零特征值，各个特征值之间数值差距不大，最小特征值对应模式并无明显的主导作用，这时参与因子的适用性难以保证。

2 电压稳定极限曲面法向量

2.1 电压稳定极限曲面定义

节点注入功率空间中，电压稳定极限曲面 Σ 定义为

$$\Sigma = \{(P, Q) \mid f(x, P, Q) = 0, x \in \Omega_{\text{SNB}} \cup \Omega_{\text{LIB}}\} \quad (5)$$

式中： $f(\cdot) = 0$ 为电压稳定临界点处的系统潮流方程，表达式详见式(1)； $\Omega_{\text{SNB}}, \Omega_{\text{LIB}}$ 分别代表 SNB 型和 LIB 型电压稳定临界点； Σ 为系统所有可能的电压稳定临界点处节点注入功率构成的超曲面。 Σ 上任一点存在与 Σ 正交的法向量，称为电压稳定临界点极限曲面法向量。示意图见图 1。

在图 1 中， P, Q 分别代表节点注入有功和无功功率空间，定义如本文第 1 节； Σ 代表极限曲面，

包括 SNB 和 LIB 型的电压失稳点； λ 代表当前运行点； l 代表特定的负荷增长方向； λ_c 代表 λ 在 l 的负荷增长方式下系统的失稳点，可能是 SNB 或 LIB； $T_{\lambda_c} \Sigma$ 代表 λ_c 点处 Σ 的切平面； $n_{\Sigma}(\lambda_c)$ 代表 λ_c 点处极限曲面的法向量，与切平面呈正交关系。

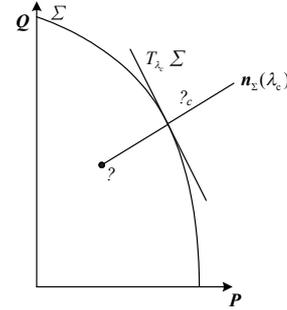


图 1 电压稳定极限曲面及其法向量

Fig. 1 Voltage stability limit surface and its normal vector

本文在 2.2 节和 2.3 节中将分别详细分析 SNB 型和 LIB 型电压稳定临界点处极限曲面法向量的求解方法。

2.2 SNB 型电压稳定临界点法向量计算

在 SNB 型电压稳定临界点 λ_s 处，对系统潮流方程(1)两边微分，得

$$\begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \end{bmatrix} \Delta x - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

对于 SNB 型电压稳定临界点，系统潮流方程的雅可比矩阵存在零特征值。将式(6)两边同时左乘潮流雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量

$$\omega^T = [\omega_1^T \quad \omega_2^T], \text{ 其中 } \omega^T \begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \end{bmatrix} = 0, \text{ 因此得到式(7).}$$

$$\omega^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

由式(7)可知，左特征向量 ω^T 与切平面 $T_{\lambda_s} \Sigma = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ 正交，因此可定义 SNB 型临界点的电压稳定极限曲面法向量 n 为

$$n^T = [\omega_1^T \quad \omega_2^T] = [n_p^T \quad n_q^T] \quad (8)$$

式中， $n_p = \omega_1, n_q = \omega_2$ 分别为法向量在节点注入有功空间和注入无功空间的投影。

为方便数据处理，一般将法向量进行归一化，如式(9)。

$$n_s^T = \frac{n^T}{\|n^T\|} \quad (9)$$

式中: \mathbf{n}_s^T 代表归一化后的法向量; $\|\bullet\|$ 代表 l 阶范数, 一般可根据电压稳定裕度的定义方式取 1 或 2。

2.3 LIB 型电压稳定临界点法向量计算

LIB 型电压稳定临界点由系统中某状态变量达到上限而引起, 故该节点的注入功率 P_i 、 Q_i 和电压幅值 V_i 均已知。临界点 λ_i 处方程可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{f}^P(\mathbf{x}) - \Delta\mathbf{P} = \mathbf{0} \\ \mathbf{f}^Q(\mathbf{x}) - \Delta\mathbf{Q} = \mathbf{0} \\ V_i - V_{\text{set}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

对上式两边取微分, 得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x^P \\ \mathbf{f}_x^Q \\ (V_i)_x \end{bmatrix} \Delta\mathbf{x} - \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x^P \\ \mathbf{f}_x^Q \\ (V_i)_x \end{bmatrix}$ 的行数比列数多 1, 故存在向量

$\mathbf{z}^T = [\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T \quad \mathbf{z}_3^T]$ 使得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1^T & \mathbf{z}_2^T & \mathbf{z}_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x^P \\ \mathbf{f}_x^Q \\ (V_i)_x \end{bmatrix} = \mathbf{0}^T \quad (12)$$

两边左乘 \mathbf{z}^T , 得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1^T & \mathbf{z}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (13)$$

由式(13)可得电压稳定极限曲面的法向量为

$$\mathbf{n}^T = [\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T] = [\mathbf{n}_p^T \quad \mathbf{n}_Q^T] \quad (14)$$

与 2.2 节中相同, 将 \mathbf{n}^T 归一化得到 \mathbf{n}_λ^T 。根据 2.2 节和 2.3 节中分析, 定义极限曲面法向量集为

$$\mathbf{n}_L^T = \{\mathbf{n}_\lambda^T \mid \lambda \in \Sigma\} \quad (15)$$

3 极限曲面法向量指标

电压稳定临界点处, 含负荷增长参数的潮流方程可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{f}^P(\mathbf{x}) - \mathbf{P}(l) = \mathbf{0} \\ \mathbf{f}^Q(\mathbf{x}) - \mathbf{Q}(l) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (16)$$

式中, l 为负荷增长因子, 用以表征系统的电压稳定裕度。在 PQ 节点 i 装设分布式电源, 输出有功功率为 ΔC_i , 即节点 i 的注入有功增加 ΔC_i , 修正式(16)并对两边微分得式(17)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x^P \\ \mathbf{f}_x^Q \end{bmatrix} \Delta\mathbf{x} - \begin{bmatrix} \mathbf{P}_\lambda \\ \mathbf{Q}_\lambda \end{bmatrix} \Delta\lambda + \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{C} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $\Delta\mathbf{C}$ 中节点 i 对应元素为 ΔC_i , 其余元素为 0。由 1.2 节和 1.3 节的分析, 式(17)两边左乘法向量 \mathbf{n}^T , 可得

$$\Delta\lambda / \Delta C_i = n_{p_i} / (n_p^T \mathbf{P}_\lambda + n_Q^T \mathbf{Q}_\lambda) \quad (18)$$

式中, n_{p_i} 为 \mathbf{n}_p 中节点 i 对应的分量, 本文称之为法向量指标。由式(18)可知, n_{p_i} 越大, 在节点 i 装设分布式电源对电压稳定性的提高越明显。

4 随机场景下电压稳定裕度

目前, 分布式电源主要是风电机组或者光伏电池, 这些新能源都具有随机性、间歇性等特点, 要评估分布式能源对系统安全稳定性的影响, 必须引入能够考虑随机性的指标。因此, 本文提出将随机场景下的电压稳定裕度作为分布式电源接入影响效果的评价指标。

电压稳定裕度有多种求解方法, 其中以连续潮流最为常用。连续潮流作为数值延拓法在电力系统潮流方程中的应用, 于上世纪 90 年代初提出。一般地, 定义系统在失稳点处的临界负荷值 l_{\max} 为系统的电压稳定裕度。

本文计及负荷的波动, 利用拉丁超立方采样生成独立的正态分布随机样本作为随机负荷, 并将其代入连续潮流中, 计算若干次, 得到电压稳定裕度的期望 l_{mean} , 并以此作为衡量电网在该分布式电源配置方案下的电压稳定裕度。

4.1 拉丁超立方采样

拉丁超立方是一种分层采样技术, 相比于普通采样, 拉丁超立方采样效率高, 稳定性好。这使得相应的蒙特卡洛模拟方法的精度也更高。其主要过程一般分为采样和排序过程。具体过程如下。

1) 采样

假设维度为 n 的随机向量 $\mathbf{R} = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ 中的变量采样规模均为 N 。首先将随机变量 X_m 的累积分布函数 $Y_m = F_m(X_m)$ 的值域均分为 N 等分, 如图 2 所示, 然后从每个子区间中选取一个 Y_m 的采样值, 如图中 $(n - \text{rand})/N$, 然后利用累积分布函数的反函数求得随机变量 X_m 的采样值, 如 x_{mm} 。这样重复 N 次, 最终得到采集的样本。由于拉丁超立方采样时是在均分的空间中进行的, 采样得到的结果不会出现重叠区域, 因此采样效率高。采样过程见图 2。

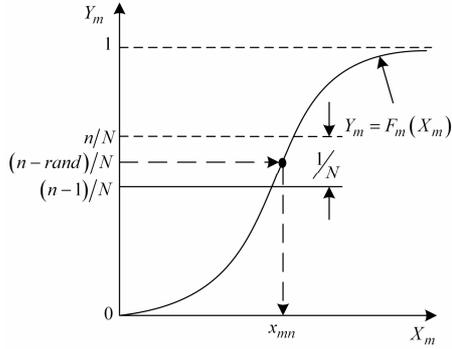


图2 拉丁超立方采样
Fig. 2 Latin hypercube sampling

2) 排序

拉丁超立方采样方法通过排序来改变各随机变量采样值的排列顺序, 使得相互独立的随机变量采样值的相关性趋于零。这样可以最大程度地模拟原始数据的性质。排序的主要方法包括遗传算法^[13]、Cholesky 分解^[14]和 Gram-Schmidt 正交化^[15]等。

4.2 随机场景下电压稳定裕度求取过程

在随机场景下, 求取电压稳定裕度的具体步骤如下:

- Step1 输入数据, 包括网络结构、网络参数、采样规模 N 等。
- Step2 利用拉丁超立方采样得到负荷以及风电机组出力的样本矩阵 $L_{g \times N}$ 和 $W_{s \times N}$ 。
- Step3 Monte-Carlo 模拟开始, 计数器 $i = 1$ 。
- Step4 利用排序技术抽取负荷和风电机组出力样本 L_{gi} 和 W_{si} ($i \in 1, \dots, N$)。
- Step5 利用 L_{gi} 和 W_{si} 更新网络参数, 并进行连续潮流计算, 求得该样本配置下的电压稳定裕度 l_i 。
- Step6 判断是否 $n = N$, 若满足, 算法停止; 否则, 转 step 1。
- Step7 计算电压稳定裕度期望值, 其中

$$l_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (19)$$

流程图如图 3 所示。

在确定分布式能源的接入位置及容量后, 根据以上步骤, 可以求出随机场景下的电压稳定裕度, 从而对其接入的效果进行评估。

5 算例分析

通过前面的分析, 本文采用 IEEE39 节点系统作为测试算例, 对本文提出的方法进行分析。

5.1 基于拉丁超立方采样 Monte-Carlo 法的收敛性

当 Monte-Carlo 模拟的计算次数趋于无穷时, 该方法可精确得到状态变量的统计学信息, 但这在

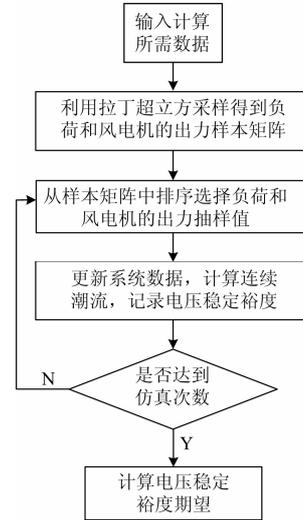


图3 随机场景下电压稳定裕度计算流程图
Fig. 3 Flowchart of voltage stability margin calculation in stochastic scenario

实际中无法做到。实际中必须确定一个经济的模拟次数, 即在计算代价和计算精度之间折衷。本文对随机场景下电压稳定裕度的 Monte-Carlo 计算次数进行分析, 得出适合于本文情况的模拟次数, 节省仿真时间。

本文设定所有负荷均满足正态分布, 其方差大小为其期望的 15%; 普通发电机的有功、无功出力为确定型变量, 系统各节点的负荷按初始比例和初始功率因数增长, 负荷增量由各发电机按其有功备用比例承担。以 50 000 次 Monte-Carlo 计算结果为基准, 分别计算 200、400、600、800、1 000、1 200 次, 定义计算误差为

$$\varepsilon = \frac{\|l_k - l_{50000}\|}{\|l_{50000}\|} \times 100\% \quad (20)$$

式中: l_{50000} 代表 Monte-Carlo 计算 50 000 次得到的结果; l_k 代表计算 k 次的结果, 本文中为 200、400、600、800、1 000、1 200 次。误差计算结果见图 4。

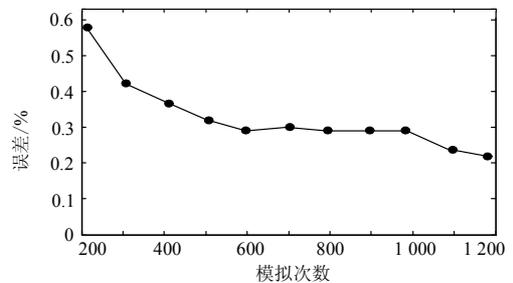


图4 误差曲线图
Fig. 4 Error curves

由图 4 可得, 当模拟次数大于 600 之后, 计算误差下降缓慢, 因此, 本文取 600 作为后续分析中 Monte-Carlo 模拟的计算次数。

5.2 LIB 型电压临界点情况

本节采用与 5.1 节中相同的潮流过渡方式, 系统将达到 LIB 型电压稳定临界点, 由发电机节点 37 的无功出力越限导致。计算此时各节点的极限曲面法向量和参与因子(以最小特征值对应模式代替), 结果如图 5 所示。计算各节点装设 1 MW 分布式电源后电压稳定裕度的增量, 统计电压稳定裕度增量与法向量指标和失稳模式参与因子的关系如图 6 所示。

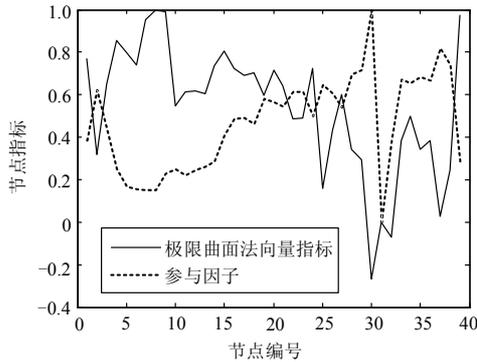


图 5 LIB 情况: 法向量指标与参与因子对比

Fig. 5 Comparison of normal vector index and participation factor for LIB case

从图 5 可得, 在两种指标下分布式电源接入点的选择不一致。其中, 节点 6 的参与因子为 0.156 6, 小于节点 19 的参与因子 0.582 2, 而装设 1 MW 的分布式电源提高的电压稳定裕度分别为 0.673 5 MW 和 0.541 9 MW, 其指标与电压稳定裕度改变关系相反。而节点 6 的极限曲面法向量指标为 0.741 1, 节点 19 为 0.597 0, 与电压稳定裕度变化关系相同。

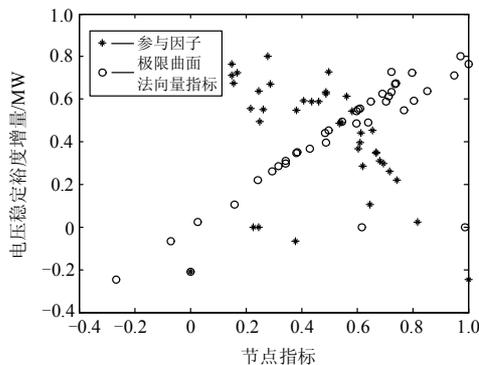


图 6 LIB 情况: 节点指标与电压稳定裕度增量的关系

Fig. 6 Relation between node indices and voltage stability increment for LIB case

由图 6, 在 LIB 情况下参与因子与电压稳定裕度增量没有良好的对应关系, 这是由于 LIB 型电压

临界点处系统潮流雅可比矩阵最小特征值不为 0, 无起主导作用的关键模式, 因此无法有效指导分布式电源选址。而极限曲面法向量指标则与电压稳定裕度增量有线性的对应关系, 可以较准确地对分布式能源备选节点进行选址。

5.3 SNB 型电压临界点情况

将 IEEE39 节点系统的发电机节点 37 的无功出力上限增大 100 Mvar, 潮流过渡方式与 5.1 节一致, 该情况下系统的失稳点为 SNB。各节点的法向量指标和参与因子如图 7 所示。各节点装设 1 MW 的分布式电源后电压稳定裕度的增量与参与因子关系如图 8。

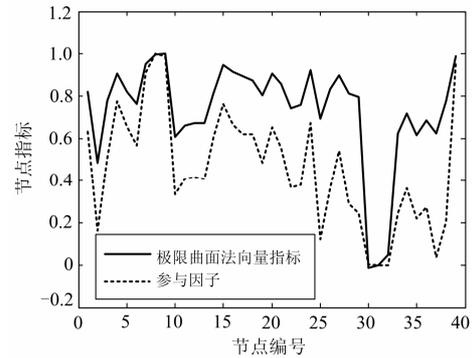


图 7 SNB 情况: 法向量指标与参与因子对比

Fig. 7 Comparison of normal vector index and participation factor for SNB case

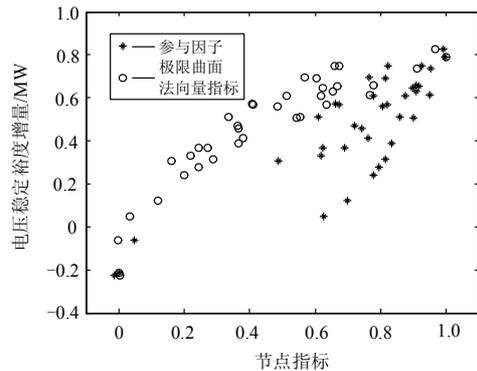


图 8 SNB 情况: 节点指标与电压稳定裕度增量的关系

Fig. 8 Relation between node indices and voltage stability increment for SNB case

由图 7 可知, 极限曲面法向量指标与参与因子大小变化趋势相同, 由图 8 可知, 在 SNB 情况下, 极限曲面法向量指标与参与因子两种指标取值不同, 但大小关系相同。而由图 8 可得, 极限曲面法向量指标比参与因子的分布更加均匀, 可以更好地进行分布式电源选址。

6 结论

本文基于电压稳定极限曲面法向量定义, 提出

利用极限曲面法向量进行分布式电源选址的方法。理论分析和仿真算例均验证了本文提出方法的有效性。本文的结论如下：

1) 相比于参与因子，本文提出的指标可以更有效地在 LIB 情况下对分布式能源进行选址，在此情况下，参与因子的选址方法是失效的。

2) 而当处于 SNB 情况时，极限曲面法向量指标和参与因子的大小关系相同，基于两种指标的选址方式具有相似性。但相比于参与因子，极限曲面法向量指标分布更加均匀，利用其进行分布式电源选址效率更高。

3) 综上所述，本文提出的方法是对参与因子的补充和改进，比参与因子具有更广的适用范围和更好的性质，可以提高选择分布式能源位置的效率。

参考文献

[1] 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 Congying, 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.

[2] 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.

[3] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-101.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-101.

[4] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[5] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network in incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.

[6] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布

式电源在配电网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.

[7] LI H, JIN Y, CHENG H. A novel reactive power planning based on improved particle swarm optimization with static voltage stability[J]. European Transactions on Electric Power, 2010, 20: 1129-1137.

[8] SONG S H, LIM J U, MOON S I. Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 70(1): 7-15.

[9] GAO B, MORISON G K, KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542.

[10] MANSOUR Y, XU W, ALVARADO F, et al. SVC placement using critical modes of voltage instability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 757-763.

[11] DOBSON I, LU L. Computing an optimum direction in control space to avoid stable node bifurcation and voltage collapse in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(10): 1616-1620.

[12] KATAOKA Y, SHINODA Y. Voltage stability limit of electric power systems with generator reactive power constraints considered[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 951-962.

[13] 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 90-96.
LI Junfang, ZHANG Buhuan. Probabilistic load flow based on improved latin hypercube sampling with evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 90-96.

[14] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid latin hypercube sampling and cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 661-667.

[15] YU H, ROSEHART B. Probabilistic power flow considering wind speed correlation of wind farms[C] // 17th Power Systems Computation Conference. Stockholm, Sweden: PSCC, 2011: 1-7.

收稿日期：2014-05-25； 修回日期：2014-06-17

作者简介：

邓大上(1990-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统电压稳定与控制；E-mail: 823184245@qq.com

房鑫炎(1963-)，男，博士，副教授，研究方向为电力系统继电保护及系统安全。

(编辑 周金梅)