

基于电压稳定极限曲面法向量的风电接入配电网 随机无功优化

文立斌¹, 李俊¹, 邓大上², 房鑫炎²

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 利用电压稳定极限曲面法向量指标对配电网无功补偿节点进行选址, 在此基础上利用遗传算法对配电网进行无功优化。首先对风电机的出力进行建模, 然后利用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛方法得到系统的节点电压、风电机组无功出力、电压稳定裕度等变量的期望与标准差。IEEE 33 节点系统的计算结果表明, 所提方法可以改善配电网无功分布, 提高电压水平, 降低配电网运行的风险。数值分析的结果表明, 该方法可以有效选择系统的薄弱节点, 使得系统各个节点电压分布更加均匀, 同时能够给系统运行留出更多裕量。

关键词: 风电; 配电; 随机潮流; 电压稳定极限曲面; 无功优化; 蒙特卡洛法; 遗传算法; 稳定

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.014

0 引言

随着分布式风力发电 DWG (Distributed Wind Generation) 技术的快速应用, 配电网规划运行的随机性日益显著。DWG 一般指直接接入配电网用户侧的小型风电发电设备^[1], 大量接入后, 配电网成为多电源网络, 潮流分布的变化可能导致无功分布的不平衡, 从而导致电压问题^[2-8]。为保障 DWG 接入后系统的安全稳定性, 必须对 DWG 接入后配电网进行无功优化。

传统的无功优化大多基于确定型方法^[4-8], 无法对随机变量进行建模。针对该问题, 文献[3]应用多场景方法对分布式风电出力进行建模, 分为额定运行、欠额定、停机 3 个场景, 以网损为目标函数进行无功优化。但场景划分会带来误差, 因此该方法并不能真实地反映随机性给无功优化带来的问题。

目前衡量配电网电压稳定性的指标主要有第一类指标^[6]和第二类指标^[7], 2 类指标均基于潮流解的存在性, 因此并不能很好地指示当前运行点与失稳点的距离。文献[6]采用雅可比矩阵最小奇异值作为电压稳定指标, 但其不直观且非线性较强。在系统重载时, 奇异值微小的变化就会导致电压失去稳定。基于这些问题, 有必要直接对系统输入变量的随机性进行建模并选择性质更好的电压稳定裕度指标。静态电压稳定裕度以节点注入功率的最大可增长量作为指标, 物理意义明确, 在电力系统规划和运行中应用广泛。

随机潮流于 20 世纪 70 年代由 Borkowska 提出^[9], 可综合分析各种随机因素对系统的影响, 是静态随机分析的有力工具。经过几十年的发展, 随机潮

流形成了点估计法^[10-12]、半不变量法^[13-16]、蒙特卡洛方法^[17-18]等分析方法, 前 2 种方法快速性好。虽计算代价大, 但作为离线分析, 采用蒙特卡洛法进行研究可以得到更加准确的结论。

在无功优化中, 由于备选节点较多, 若将其全集作为待选节点可能导致算法效率低下, 而传统基于参与因子的选址方法无法处理极限诱导分岔 LIB (Limit Induced Bifurcation) 情况, 因此, 本文提出采用电压稳定极限曲面法向量指标对无功优化备选节点进行选址。

基于前文, 本文提出一种基于拉丁超立方采样含相关性的无功优化方法, 首先对分布式电源进行选址, 并利用拉丁超立方生成分布式电源的处理样本, 采用连续潮流求取电压稳定裕度作为稳定性约束指标, 在此基础上以网损及其方差之和作为目标函数对配电网进行无功优化。与优化前结果相比, 优化后配电网的电压更加均匀, 电压稳定裕度也得到提升。

1 DWG 出力的多场景分析

1.1 风速的概率分布

一般地, 风速服从双参数 Weibull 分布, 其概率密度函数可表示为^[19]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

$$k = (\sigma_{\text{wind}} / E_{\text{wind}})^{-1.086} \quad (2)$$

$$c = E_{\text{wind}} / \Gamma(1 + 1/k) \quad (3)$$

其中, v 为风速; k 为 Weibull 分布的形状参数; c 为尺度参数; E_{wind} 和 σ_{wind} 分别为风速的平均值和标准差。

联立式(1)——(3), 风速的累积分布函数可表示为:

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp \left[- (v/c)^k \right] \quad (4)$$

1.2 DWG 的概率出力

本文风电场采用恒功率因数控制,对式(4)进行线性化近似得到有功出力与风速的关系如式(5)所示,因此,欲对风电场建模,必须首先产生风速样本。

$$P_W = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ P_{WR} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WR} & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{WR} 为风电场额定功率; v_{ci} 、 v_r 和 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

对于服从 Weibull 的风速样本 $\mathbf{W}=[v_1, \dots, v_j, \dots, v_n]^T$, 可利用变换将其映射到正态变量空间中, 如式(6)所示:

$$z_i = \Phi^{-1}(F_i(v_i)) \quad i=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

其中, F_i 为 Weibull 分布的累积分布函数; Φ 为标准正态分布的累积分布函数。而在 2 个空间中变量之间的相关系数转化经验公式为:

$$T(\rho_{ij}) = 1.063 - 0.004 \rho_{ij} - 0.2 \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - 0.001 \rho_{ij}^2 - 0.337 \left(\frac{\sigma_i^2}{\mu_i^2} + \frac{\sigma_j^2}{\mu_j^2} \right) + 0.007 \rho_{ij} \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - 0.007 \frac{\sigma_i \sigma_j}{\mu_i \mu_j} \quad (7)$$

其中, μ 、 σ 分别为正态空间中变量的期望与标准差; ρ_{ij} 为 Weibull 分布空间中变量之间相关性; $T(\rho_{ij})$ 为正态空间中变量相关性。

因此, 可在正态空间中通过拉丁超立方^[20]产生含相关性的序列 $\mathbf{Z}$, 并利用式(6)将其转化到 Weibull 分布空间中。当得到风速样本后, 根据式(5)得到风电场有功出力样本。

1.3 电压稳定极限曲面法向量

一般地, 电力系统失稳点的类型可分为鞍节点分岔 SNB(Saddle Node Bifurcation)和 LIB, 在极限点处的法向量具有指导系统薄弱节点选取的作用。

1.3.1 SNB 型电压稳定临界点法向量计算

在 SNB 型临界点处, 对系统潮流方程进行微分, 得式(8):

$$\begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

其中, f_x^P 为有功功率对状态变量的导数矩阵; f_x^Q 为无功功率对状态变量的导数矩阵; ΔP 和 ΔQ 分别为有功功率增量和无功功率增量。

在 SNB 型电压稳定临界点处, 系统潮流方程的雅可比阵奇异, 存在零特征值。因此, 在式(8)左右两边同时左乘雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量 $\omega^T = [\omega_1^T \quad \omega_2^T]$, 得式(9):

$$\omega_0^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

由式(9)得 SNB 型电压稳定极限曲面的法向量 $\mathbf{n}$ 为:

$$\mathbf{n}^T = [\omega_1^T \quad \omega_2^T] = [\mathbf{n}_P^T \quad \mathbf{n}_Q^T] \quad (10)$$

其中, $\mathbf{n}_P = \omega_1$ 、 $\mathbf{n}_Q = \omega_2$ 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。

1.3.2 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超限而引起(在电压稳定分析中通常是发电机无功出力), 故电压失稳时, 该节点的注入功率 P_i 、 Q_i 和电压幅值 U_i 均已知。因此同式(8), 临界点处方程可表示为:

$$\begin{cases} f^P(\mathbf{x}) - \Delta P = 0 \\ f^Q(\mathbf{x}) - \Delta Q = 0 \\ U_i - U_{set} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, U_{set} 为已知的电压幅值; U_i 为节点电压对状态变量的导数矩阵。

对式(11)两边取微分, 可得:

$$\begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \\ (U_i)_x \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

其中, 矩阵 $\begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \\ (U_i)_x \end{bmatrix}$ 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:

$$[\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T \quad \mathbf{z}_3^T] \begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \\ (U_i)_x \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

式(12)两边左乘 $\mathbf{z}^T$, 得:

$$[\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

由式(14)可推得电压稳定极限曲面的法向量 $\mathbf{n}$ 为:

$$\mathbf{n}^T = [\mathbf{z}_1^T \quad \mathbf{z}_2^T] = [\mathbf{n}_P^T \quad \mathbf{n}_Q^T] \quad (15)$$

1.3.3 用于无功补偿选址的法向量指标

电压稳定临界点处, 含负荷增长参数 λ 的潮流方程可表示为:

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

其中, λ 为负荷增长因子, 表征系统的静态电压稳定裕度。在 PQ 节点 i 补偿电容 ΔC_i , 即节点 i 的注入无功增加 ΔC_i , 式(16)变为:

$$\begin{bmatrix} f_x^P \\ f_x^Q \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} - \begin{bmatrix} P_\lambda \\ Q_\lambda \end{bmatrix} \Delta \lambda + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta C \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

其中, P_λ 、 Q_λ 分别为负荷的有功功率因数和无功功率因数; ΔC 中 ΔC_i 对应节点 i 的补偿量, 其余元素均为 0。由 1.2 节和 1.3 节的分析, 式(17)两边左乘法向量

n^T ,可得:

$$\Delta\lambda/\Delta C_i = n_{Q_i}/(n_P^T P_\lambda + n_Q^T Q_\lambda) \quad (18)$$

其中, n_{Q_i} 为 n_Q 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_{Q_i} 越大, 节点 i 无功补偿对电压稳定性的提高越明显。故选择法向量指标较大的节点进行无功补偿。

2 风电接入配电网无功优化模型

风电接入后, 系统运行的随机性增加, 可能会出现过电压与低电压的情况, 所以本文无功优化是为降低网损、提升系统电压水平以及减小配电网运行的风险。本文数学模型包括目标函数、潮流方程约束和不等式约束构成。

a. 目标函数。

$$\min g = aP_{\text{loss}}(\bar{U}, \bar{\theta}, \bar{P}_l, \bar{Q}_l, \bar{Q}_g, V) + bS_{\text{td}}(\bar{U}, \bar{\theta}, \bar{P}_l, \bar{Q}_l, \bar{Q}_g, V) \quad (19)$$

其中, P_{loss} 和 S_{td} 分别为系统有功网损及其方差; 含“ $\bar{U}$ ”变量为随机变量期望值; 含“ $\tilde{U}$ ”变量为随机变量值; U 和 θ 分别为节点电压幅值及其相角; P_l 和 Q_l 分别为节点的有功负荷以及无功负荷; Q_g 为风力发电机的无功出力; V 为控制变量, 包括发电机的机端电压、无功补偿设备出力、变压器分接头; a, b 为权重系数。这样设置目标函数的目的在于使得求得的系统最优运行点更加鲁棒。

b. 无功优化约束。

$$\text{s.t. } f(\bar{U}, \bar{\theta}, \bar{P}_l, \bar{Q}_l, \bar{Q}_g, V) = 0 \quad (20)$$

$$U_{\min} < \bar{U} < U_{\max} \quad (21)$$

$$Q_{g, \min} < \bar{Q}_g < Q_{g, \max} \quad (22)$$

其中, f 为潮流方程等式约束; 因为风力发电机出力有随机性, 这里取上限 $Q_{g, \max}$ 为风力发电有功出力的 d 倍, 即 $Q_{g, \max} = dP_g$, 而 P_g 为风电场有功出力向量, 其元素由 1.2 节中给出; 下标 $\max$ 和 $\min$ 分别表示上限和下限。

c. 电压稳定约束。

$$\lambda_{\max} \geq \lambda_{\text{set}} \quad (23)$$

其中, $\lambda_{\max}$ 为考虑风电波动情况下的负荷裕度期望值, 定义见 3.2 节; λ_{set} 为电压稳定裕度下限。

d. 随机变量机会约束。

$$S_{\text{td}}(U)/\bar{U} \leq S_{\text{td}U\text{set}} \quad (24)$$

$$S_{\text{td}}(Q_g)/\bar{Q}_g \leq S_{\text{td}Q_g\text{set}} \quad (25)$$

其中, $S_{\text{td}}(\cdot)$ 为变量标准差; $S_{\text{td}U\text{set}}$ 和 $S_{\text{td}Q_g\text{set}}$ 分别为节点电压和发电机无功出力的归一化标准差。

e. 控制变量约束。

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (26)$$

其中, 下标 $\max$ 和 $\min$ 分别表示变量上、下限。

3 模型的求解

3.1 蒙特卡洛模拟的配电网概率潮流

利用 1 节中的方法可得到 DWG 的概率出力样本, 同时假设负荷服从正态分布, 其标准差等于其期望值的 5%。可利用蒙特卡洛模拟方法求取网损、节点电压、发电机出力的数字特征。其具体计算过程如图 1 所示。

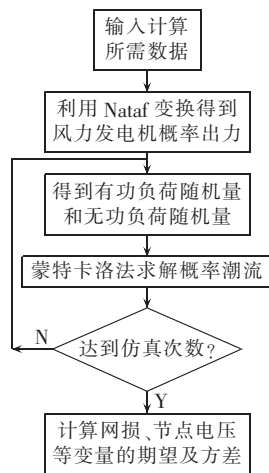


图 1 配电网概率潮流计算流程图

Fig.1 Flowchart of calculation of probabilistic power flow of distribution network

3.2 融合连续潮流的随机潮流方法

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 20 世纪 90 年代初提出。一般地, 定义系统在鞍节点处的负荷裕度 $\lambda_{\max}$ 描述系统的负荷裕度。

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, 得到负荷裕度数字特征。

3.3 遗传算法求解无功优化流程

本文采用遗传算法对本文模型进行求解, 将约束作为罚项与目标函数值相加, 使得问题转化为无约束优化问题。

(1) 遗传算法主流程:

a. 初始化解集, 包括风力发电机机端电压、无功补偿设备出力;

b. 计算解集中各个解的适应值;

c. 利用俄罗斯轮盘赌法产生父代染色体, 采取精英策略, 将父代中适应值最高的染色体直接遗传到下一代以加快算法收敛;

d. 以固定概率 p_c 对随机选出的父代染色体进行 2 点交换操作;

e. 以固定概率 p_m 对该代的染色体进行变异操作;

f. 若遗传算法重复 N 步最优适应值不下降或者达到迭代数上限,算法结束,否则转步骤 b。

(2)适应值计算:

a. 按 3.1 节中方法计算网损、节点电压和风力发电机无功出力期望与方差;

b. 检查约束式(21)—(25)是否满足,若否,使用恒定罚因子 ϖ 在目标函数中加上变量与上下限差值的平方;

c. 输出染色体适应值。

4 算例分析

4.1 算例分析基础

本文利用 IEEE33 节点配电网系统作为测试算例,系统结构如图 2 所示,电压等级为 12.66 kV,有功负荷 3 715 kW,无功负荷为 2 300 kvar。假设各节点负荷均服从独立正态分布,期望等于负荷初始值,标准差为期望值的 5%。风电机额定功率为 600 kW,无功出力上限如 1.2 节中定义。切入风速为 5 m/s,额定风速和切出风速分别为 8 m/s 和 20 m/s,参数 k 和 c 分别为 2.0 和 8.5。系数 a 和 b 均设为 0.5; d 设为 0.8;针对约束式(21)—(25)的 ϖ 在本文中分别设置为 5.8、2.4、5.5、10.7、10.7。以电压稳定极限曲面法向量方法选择待选补偿点,即节点 2、4、6、7、19、20、21、22、23、24、25、26、27、28、29、30、31、32;遗传算法代数数为 100,交叉率为 0.9,变异率为 0.1。

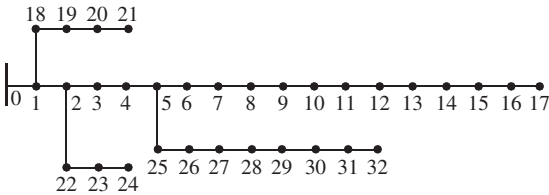


图 2 IEEE 33 节点系统

Fig.2 IEEE 33-bus system

4.2 无功优化结果分析

在本节的分析中,风电机装设在节点 17 上。约束式(21)中 $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别设为 1.06 p.u. 和 1 p.u.;约束式(22)中 $Q_{g,\min}$ 的设为 0, $Q_{g,\max}$ 为 IEEE33 节点系统中初始数据;约束式(23)中的 λ_{set} 设为 1.8,式(24)中 $S_{\text{dl}U_{\text{set}}}$ 和 $S_{\text{dl}Q_{\text{gmax}}}$ 均设为 0.05。无功补偿变化范围 0~1 Mvar,补偿步长 0.2 Mvar;风电机机端电压设定为 1~1.1 p.u.。计算结果及配置方案分别见表 1 与表 2(补偿为 0 节点未列出,表 2 中风电机机端电压为标么值)。当选址方式采用参与因子^[21]时,节点 5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、26、27、28、29、30、31、32 选为备选节点,在相同的遗传算法参数设置下,优化结果见表 2。补偿前后电压稳定裕度(标么值)对比如图 3 所示;补偿前后节点电压分布(标么值)如

图 4 所示。

由表 2 中结果,经过优化之后系统的网损期望值降低,同时负荷裕度期望值得到提高。这说明在经过无功优化后系统的经济运行水平和电压稳定性水平均得到提高;与此同时,负荷裕度方差降低,系统的运行风险也降低了,运行方案更加鲁棒。而比较

表 1 IEEE 33 节点系统结果(节点 17 装设风机)

Table 1 Calculative results for IEEE 33-bus system (wind power generator is installed at node 17)

参数	补偿前	补偿后	
		本文方法	参与因子
网损/MW	0.308	0.274	0.284
网损标准差/MW	0.02	0.017	0.019
负荷裕度	1.53	1.87	1.72
负荷裕度标准差	0.21	0.09	0.17
违反确定型约束	26	0	0
违反机会约束	34	0	4
平均计算时间/s	—	3.16	3.17

表 2 IEEE 33 节点系统无功配置方案(节点 17 装设风机)

Table 2 Reactive power allocation scheme for IEEE 33-bus system(wind power generator is installed at node 17)

控制变量	序号		补偿设置	
	本文方法	参与因子	本文方法	参与因子
电容补偿/Mvar	2	5	1.0	1.0
	4	6	0.6	0.6
	6	7	0.4	0.6
	7	8	0.2	0.4
	19	9	0.2	0.4
	20	10	0.6	0.4
	21	11	0.2	0.2
	22	12	0.2	0.4
	23	13	0.8	1.0
	24	14	0.6	0.4
	25	15	0.4	0.2
	26	26	1.0	1.0
	27	27	0.4	0.4
	28	28	0.2	0.2
	29	29	0.2	0.4
	30	30	0.2	0.6
	31	31	0.2	0.6
	32	32	0.4	0.2
风电机机端电压	17	17	1.044 2	1.052 1

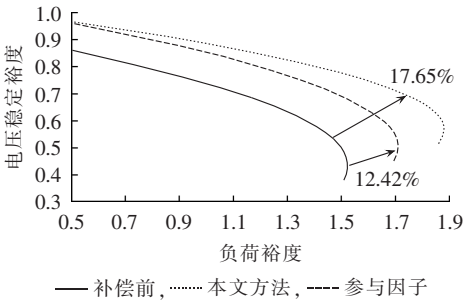


图 3 本文与参与因子法选址补偿前后电压稳定裕度比较

Fig.3 Comparison of voltage stability margin between pre-compensation and post-compensation for proposed method and participation factor method

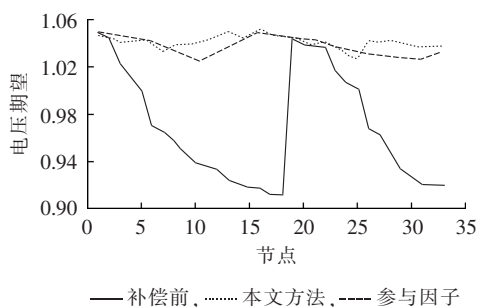


图 4 补偿前后节点电压期望

Fig.4 Comparison of voltage expectation between pre-compensation and post-compensation for proposed method and participation factor method

利用电压稳定极限运行方向量和参与因子 2 种不同选址方法的效果可知,本文方法可以更有效地降低系统的网损并提高负荷裕度,从而保证了系统的安全稳定运行。

同时,在无功优化前,基态运行点分别违反 26 个确定型约束、34 个机会约束,这表明该运行点的运行风险极大。而采用参与因子进行选址优化后,确定型约束全部满足,但仍然有 4 个机会约束不满足。而采用本文方法,确定型约束和机会约束均得到满足。因此,采用本文方法可以有效地降低系统的安全风险。

从图 3 中可得,由于直接指示失稳点的方向,因此使用电压稳定裕度极限曲面法向量作为选址方法可得到比参与因子更好的结果。

从目前配电网的结构来看,按照表 2 中配置多节点的电容器不太符合实际情况。但从长远而言,随着分布式电源、电动汽车等分布式能源的大量接入,传统基于潮流单向流动的配电网控制方式可能并不适用,因此有必要在多点装设电容以维持配电网的安全稳定性。

从图 4 也可以看出,在补偿前系统的电压水平较低,沿着潮流的流动方向电压下降较为明显,使得系统中很多节点均不符合节点电压的运行要求,在补偿后,电压水平有了较大的提升,节点电压都运行在规定的 $[1, 1.06]$ p.u.区间。而通过本文方法和参与因子选址法的对比可发现,本文方法进行无功优化后节点电压分布更平均,运行的风险更小。

5 结论

本文针对 DWG 接入配电网的无功优化进行研究,建立了带状态变量方差约束的无功优化模型,经过分析,得到的结论如下:

a. 本文提出的补偿方法可以在提高系统运行经济性(网损降低)的情况下提高系统的电压稳定性;

b. 计算结果表明,与基态情况相比,本文方法大幅降低了系统运行的风险,运行点满足所有的确定

型约束和机会约束;

c. 与参与因子选址方法相比,本文方法能使得系统节点电压的分布更加均匀,从而进一步减小系统运行的风险;

d. 利用电压稳定极限运行曲面法向量指标作为无功备用选址指标对于提高电压稳定裕度有更好的作用,其效果好于参与因子。

参考文献:

- [1] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
LIANG Caihao,DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(12):53-56.
- [2] LIU Haifeng,JIN Licheng,JAMES D M,et al. Planning reconfigurable reactive control for voltage stability limited power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(2):1029-1038.
- [3] 何禹清,彭建春,毛丽林,等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):38-41.
HE Yuqing,PENG Jianchun,MAO Lilin,et al. Reactive power optimization in distribution system with multiple wind power generators [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):38-41.
- [4] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.
CHEN Lin,ZHONG Jin,NI Yixin,et al. Optimal reactive power planning of radial distribution systems with distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(14):20-24.
- [5] 李晶,王素华,谷彩连,等. 基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(6):59-63.
LI Jing,WANG Suhua,GU Cailian,et al. Research of reactive power optimization control in distribution networks based on genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control,2010,38(6):59-63.
- [6] 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.
- [7] HADJSAID N,CANARD J,DUMAS F. Dispersed generation impact on distribution networks [J]. IEEE Computer Applications in Power,1999,12(2):22-28.
- [8] 胡骅,吴汕,夏翔,等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):13-17.
HU Hua,WU Shan,XIA Xiang,et al. Computing the maximum-penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):13-17.
- [9] BORKOWASKA B. Probabilistic load flow [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1974,27(3):752-759.
- [10] HADJSAID N,CANARD J,DUMAS F. Dispersed generation impact on distribution networks [J]. IEEE Computer Applications in

- Power, 1999, 12(2): 22-28.
- [11] MORALES J M, PEPREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1594-1601.
- [12] HONG H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59(3): 261-267.
- [13] MORALES J M, BARINGO L. Probabilistic power flow with correlated wind sources[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(5): 641-651.
- [14] ALLAN R N, AL-SHAKARCHI M R G. Probabilistic techniques in AC load flow analysis[J]. Proceeding of the IEEE, 1977, 124(2): 154-160.
- [15] ZHANG Pei, LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [16] 董雷, 程卫东. 含风电场的电力系统概论潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 87-91.
- DONG Lei, CHENG Weidong. Probabilistic load flow calculation for power grid containing wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 87-91.
- [17] EL-KHATTAM, W, HEGAZY Y G. Investigating distributed generation systems performance using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 524-532.
- [18] BERIZZI A, BOVO C, DELFANTI M, et al. A Monte Carlo approach for TTC evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 735-743.
- [19] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
- ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [20] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80-88.
- CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(22): 80-88.
- [21] GAO B, MORISON G K, KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542.

作者简介:



文立斌

文立斌(1971—), 男, 广西永福人, 高级工程师, 硕士, 主要从事机网协调技术、电网模型参数优化与电网仿真、调速系统建模及其模型参数测试研究(E-mail: 854661004@qq.com);

李俊(1968—), 男, 广西平乐人, 高级工程师, 主要从事机网协调方面的工程应用与技术研究。

Stochastic reactive power optimization based on normal vector of voltage stability limit surface for distribution network with wind power

WEN Libin¹, LI Jun¹, DENG Dashang², FANG Xinyan²

(1. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Company, Nanning 530023, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The normal vector of voltage stability limit surface is adopted in the site selection of reactive power compensation node for distribution network, based on which, the genetic algorithm is applied in the reactive power optimization. The output of wind power generator is modelled and the Monte Carlo method based on Latin hypercube sampling is adopted to obtain the expectation and standard deviation of variables, such as node voltage, reactive output of wind power generator, voltage stability margin, etc. The calculative results for IEEE 33-bus system show that, the proposed method can be used to improve the reactive power distribution of distribution network, enhance its voltage level, and decrease its operational risk. The results of numerical analysis show that, the proposed method can be used to effectively select the vulnerable node, unify the voltage distribution among nodes, and remain more margins for system operation.

Key words: wind power; electric power distribution; probabilistic power flow; voltage stability limit surface; reactive power optimization; Monte Carlo methods; genetic algorithms; stability