

考虑 $N-1$ 安全的分布式电源多目标协调优化配置

刘 佳¹,徐 谦²,程浩忠¹,兰 洲²,马则良³,朱忠烈³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院,浙江 杭州 310008;3. 国家电网公司华东分部,上海 200120)

摘要: 现有风电和光伏分布式电源(DG)规划模型均未计及配电网中的主变、馈线 $N-1$ 约束,所得配置方案未必满足安全性要求。为解决该问题,提出一种考虑 $N-1$ 安全的多目标 DG 选址定容规划模型。基于安全距离模型,介绍配电网 $N-1$ 安全评估方法和指标;利用准蒙特卡洛模拟和奇异值分解生成风光荷相关性样本矩阵以提高规划结果准确性;以年综合费最小和安全距离均衡比最小为多目标,利用机会约束规划方法建立 DG 规划模型,并采用正态边界交点联合动态小生境差分进化算法对模型加以求解。算例结果表明,所得选址定容规划方案能保证 $N-1$ 安全,实现了综合考虑系统经济性、安全性下的最优,验证了所提模型和算法是合理、有效的。

关键词: 智能配电网; 分布式电源; 选址定容; $N-1$ 安全; 动态小生境差分进化算法; 模型

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.013

0 引言

近年来,智能电网概念的提出给传统配电网带来了显著的改变。作为发、输电系统和终端用户间的重要环节,配电网正逐步实现配电自动化,快速的网络转供能力将是未来智能配电网的主要特征。与此同时,配电网层面正接入大量以风电 WTG(Wind Turbine Generation)和光伏发电 PVG(PhotoVoltaic Generation)为代表的分布式电源 DG(Distributed Generation),面临着前所未有的不确定外部环境^[1]。DG 接入配电网运行能够起到降低电能损耗、改善电能质量和减少环境污染等作用^[2],然而,由于 DG 出力具有波动性、间歇性的特点,若其接入配电网的位置及容量不合适,将会影响到配电网的正常运行。因此,有必要对接入配电网的 DG 进行选址定容优化,以确保配电网的安全性、经济性。

目前,国内外学者已对 DG 选址定容规划问题进行了大量的研究并取得了一定的成果^[2-8]。文献[2]研究了综合考虑配电公司、DG 投资商和公共社会三者之间利益的含电动汽车 DG 规划模型,并采用改进自适应遗传算法(GA)加以求解;文献[3]提出了考虑节点电压和支路电流约束的 PVG 最大准入容量计算方法;文献[4]以配电网损耗最小为目标建立了含 WTG、PVG 的可再生 DG 选址定容模型,并采用混合整数规划法进行求解;文献[5]从优化投资及运

行成本、网损、电压及电压稳定性 3 个角度建立了 DG 规划模型,并利用改进多目标粒子群优化(PSO)和模糊多权重算法求解规划方案;文献[6]建立了综合考虑 WTG、PVG、微型燃气轮机和电动汽车等多种 DG 的规划模型,并利用遗传算法求解;文献[7]给出了配电网分布式风电源机会约束规划模型,并利用混合蛙跳法对模型加以求解;文献[8]则建立了多场景时段下的 DG 优化配置模型。

现有文献均是从不同角度出发,建立 N 安全下的 DG 选址定容规划模型,并采用不同算法加以求解,而考虑到 $N-1$ 安全准则是配电网规划中的重要准则,因此现有模型所得 DG 选址定容规划方案未必满足 $N-1$ 安全,同时,对于配电网而言,主变、馈线 $N-1$ 故障也属于不确定因素范畴,而现有模型中的不确定因素建模仅包含负荷、DG 出力等正常工况下的不确定性,不确定性的内涵亟待完善。综上所述,有必要在 DG 规划阶段考虑 $N-1$ 安全。

在安全分析方面,现有方法一般都基于 $N-1$ 仿真^[9]。但用这些方法进行逐个元件 $N-1$ 校验速度慢且难以对系统的整体运行状态给出评价。为快速、定量刻画配电网中各工作点的安全裕度,配电网安全距离(DSSD)模型为一种分析配电网安全性、衡量裕度大小的新方法^[10-12]。文献[10]提出了配电网安全域的概念、模型、安全边界的拓扑性质和安全评价与控制策略;文献[11]分析了供电能力和安全域理论在配电网在线安全监控中的作用,提出了相应的预防性控制、预测性控制和优化控制措施;文献[12]以网损最小和安全距离均衡比最小为目标建立了智能配电网动态重构模型。然而,现有关于 DSSD 的文献均尚未考虑含 DG 的配电网动态安全分析,难以直

收稿日期:2016-09-08;修回日期:2017-05-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900102);国家电网公司科技项目(5211JY160004)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900102) and Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(5211JY160004)

接指导 DG 规划以保证 N-1 安全。

为弥补现有 DG 选址定容规划方法的不足,本文考虑风光荷相关性,提出了一种考虑 N-1 安全的多目标 DG 选址定容规划模型,完善了配电网不确定因素的内涵。算例仿真结果表明,本文 DG 规划模型所得规划方案在保证 N-1 安全的前提下,实现了经济性、安全性下的最优,具有安全裕度高、裕度可测、负荷扩展能力强的特点。

1 配电网 N-1 安全评估方法

1.1 DSSD 模型

1.1.1 配电网安全域

配电网安全域是在配电网主变 N-1 和线路 N-1 的约束下,配电网能够安全运行的所有工作点的集合^[11]。其定义在馈线段负荷的工作点向量;考虑馈线出口负荷计算方程、馈线 N-1 约束、主变 N-1 馈线负荷转带约束、主变-馈线负荷等式约束、主变 N-1 主变容量约束和节点电压约束。基于交流潮流的配电网安全域 Ω_{DSSD} 具体可表述为:

$$\Omega_{\text{DSSD}} = \left\{ \mathbf{W}_f \mid \begin{cases} S_F^k = \sum_l S_{f,lr}^{k,l} \\ S_{f,lr}^{k,l} + S_F^l \leq S_{F,\max}^l \quad \forall k, l \\ S_{T,lr}^{m,n} = \sum_{k \in T_m, l \in T_n} S_{f,lr}^{k,l} \\ S_T^m = \sum_{k \in T_m} S_F^k \quad \forall m \\ S_{T,lr}^{m,n} + S_T^n \leq S_{T,\max}^n \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \end{cases} \right. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{W}_f$ 为基于馈线段负荷的工作点向量; S_F^k 为馈线段 F_k 所带负荷; $S_{f,lr}^{k,l}$ 为馈线段 F_k 发生 N-1 时转带给馈线段 F_l 的负荷量; $S_{F,\max}^l$ 为馈线段 F_l 的容量; $S_{T,lr}^{m,n}$ 为主变 T_m 发生 N-1 转带给主变 T_n 的负荷量; S_T^m 为主变 T_m 所带的负荷; $k \in T_m$ 表示馈线段 F_k 出自主变 T_m 对应的母线; $S_{T,\max}^n$ 为主变 T_n 的额定容量; $U_i, U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 的电压及其上、下限。

1.1.2 配电网安全边界

配电网安全边界是由所有恰好满足 N-1 安全的临界工作点组成的一系列线性超平面。安全边界具有以下 3 个性质^[10]: 存在性, 配电网 N-1 安全边界是存在的; 线性, 配电网安全边界由线性的、紧致的且不会“打结”的超平面精确描述; 连通性, 安全边界围成的区域是连通的、内部无空洞的凸集。

1.1.3 DSSD

工作点在配电网安全域中的位置可以反映系统 N-1 安全性, 并利用安全距离来量化反映该数据^[10]。安全距离是指当前工作点到各配电网安全边界的欧氏距离, 其具体计算方法已在文献[10]中定义, 在此不再赘述。当工作点不满足 N-1 安全时, 安全距离

为负值, 绝对值越大, 此工作点不安全程度越高; 当工作点满足 N-1 安全时, 安全距离为正值, 绝对值越大, 此工作点安全程度越高。

1.2 安全裕度指标

本文选用以下 3 个 N-1 安全裕度指标^[12]。

a. 安全距离均值 V_{MSD} : 各条安全距离的平均值, 以表征全网安全距离的平均水平。 V_{MSD} 越大, 表示各条安全距离平均水平越高, 全网安全裕度越大; 反之, 全网安全裕度越小。具体计算公式为:

$$V_{\text{MSD}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{SD}}} V_{\text{SD}}^k}{n_{\text{SD}}} \quad (2)$$

其中, V_{SD}^k 为第 k 条安全距离的值; n_{SD} 为安全距离条数。

b. 安全距离均衡度 V_{EDSD} : 各条安全距离方差, 以表征全网安全距离的离散程度。 V_{EDSD} 越小, 表示各条安全距离越均衡, 在各馈线、主变容量近似相等的前提下, 各馈线出口负荷越均匀, 各馈线、主变负载率差异性越小, 全网安全裕度越大; 反之, 全网安全裕度越小。具体计算公式为:

$$V_{\text{EDSD}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{SD}}} (V_{\text{SD}}^k - V_{\text{MSD}})^2}{n_{\text{SD}}} \quad (3)$$

c. 安全距离均衡比 V_{ERSD} : 安全距离均衡度和安全距离均值之比, 以表征各安全距离的偏差与均值的相对数值关系。考虑到各安全距离的偏差越小、均值越大, 全网安全裕度越大, 因此, V_{ERSD} 越小, 系统安全性越好。具体计算公式为:

$$V_{\text{ERSD}} = \frac{V_{\text{EDSD}}}{V_{\text{MSD}}} \quad (4)$$

2 考虑相关性的风光荷概率建模

2.1 WTG 出力概率模型

风速通常采用双参数 Weibull 分布来描述^[2]:

$$f(V) = \frac{r}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{r-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^r \right] \quad (5)$$

其中, V 为 WTG 叶轮轮毂处的风速; r 和 c 分别为形参数和尺度参数。

本文的 WTG 采用恒功率因数控制, 则 WTG 出力 S_{WTG} 与风速 V 间的关系可近似用分段函数表示^[13]:

$$S_{\text{WTG}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq V \leq V_{ci} \\ S_{\text{WTG}}^r \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} < V < V_r \\ S_{\text{WTG}}^r & V_r \leq V < V_{co} \\ 0 & V \geq V_{co} \end{cases} \quad (6)$$

其中, S_{WTG}^r 为 WTG 的额定容量; V_{ci}, V_r, V_{co} 分别为 WTG 的切入风速、额定风速、切出风速。

2.2 PVG 出力概率模型

光照强度通常采用 Beta 分布来描述^[14]:

$$f(I) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{I}{I_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (7)$$

其中, I 和 $I_{\max}$ 分别为光照强度及其最大值; α 和 β 为 Beta 分布的 2 个参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

本文的 PVG 采用恒功率因数控制, 则 PVG 出力 S_{PVG} 与光照强度 I 之间的关系可近似表示为^[14]:

$$S_{\text{PVG}} = \begin{cases} S_{\text{PVG}}^r \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ S_{\text{PVG}}^r & I > I_r \end{cases} \quad (8)$$

其中, S_{PVG}^r 为 PVG 的额定容量; I_r 为额定光照强度。

2.3 负荷概率模型

负荷值通常采用正态分布来描述^[14]:

$$f(S_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_p} \exp \left[-\frac{(S_L - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2} \right] \quad (9)$$

其中, S_L 、 μ_p 和 σ_p 分别为负荷的随机量、期望和标准差。

2.4 风光荷相关性样本矩阵生成

对于含风速、光照强度和负荷的 3 维随机变量 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3]^T$, 设其相关系数矩阵为 $[\rho_{ij}]_{3 \times 3}$, 其中相关系数 ρ_{ij} 的定义如式(10)所示。

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (10)$$

其中, σ_i 和 σ_j 分别为 X_i 和 X_j 的标准差; $\text{cov}(X_i, X_j)$ 为变量 X_i, X_j 的协方差。

本文采用基于 Sobol 序列的准蒙特卡洛模拟 QMCS (Quasi Monte Carlo Simulation) 进行样本采样^[15]。同时, 考虑到相关系数矩阵非正定或非满秩, 其 Cholesky 分解不存在, 而由于相关系数矩阵均为对称阵, 其奇异值分解一直存在, 因此, 本文采用奇异值分解来对相关系数矩阵进行处理^[16]。QMCS 联合奇异值分解能够产生目标相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}}$ 下的待采样随机变量的样本矩阵, 其理论依据可参见文献^[16]。

应用 QMCS 和奇异值分解产生相关性 DG 出力矩阵的具体过程如下。

a. 设采样规模为 N_0 , 利用 QMCS 对风速、光照强度和负荷进行采样, 得到一个 $3 \times N_0$ 阶的初始样本矩阵 $\mathbf{S}_0$ 。

b. 随机生成一个 $3 \times N_0$ 阶的顺序矩阵 $\mathbf{L}$, 并按照式(10)计算 $\mathbf{L}$ 的相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}_L$ 。

c. 按照式(11)对 $\boldsymbol{\rho}_L$ 进行奇异值分解, 并通过式(12)来消除由于随机排列而产生的相关性。

$$\boldsymbol{\rho}_L = \mathbf{U}_L \boldsymbol{\Sigma}_L^{1/2} (\mathbf{U}_L \boldsymbol{\Sigma}_L^{1/2})^T \quad (11)$$

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{U}_L \boldsymbol{\Sigma}_L^{1/2})^{-1} \mathbf{L} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{U}_L$ 为由矩阵 $\boldsymbol{\rho}_L$ 奇异值分解得到的酉矩阵; $\boldsymbol{\Sigma}_L$ 为由矩阵 $\boldsymbol{\rho}_L$ 的奇异值构成的对角矩阵; $\mathbf{Z}$ 为中间矩阵。

d. 按照式(13)对目标相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}}$ 进行奇

异值分解, 并通过式(14)令 $\mathbf{Z}_u$ 的相关系数矩阵与 $\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}}$ 近似相等。

$$\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}} = \mathbf{U}_{\text{obj}} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{obj}}^{1/2} (\mathbf{U}_{\text{obj}} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{obj}}^{1/2})^T \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_u = \mathbf{U}_{\text{obj}} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{obj}}^{1/2} \mathbf{Z} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{U}_{\text{obj}}$ 为由矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}}$ 奇异值分解得到的酉矩阵; $\boldsymbol{\Sigma}_{\text{obj}}$ 为由矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{\text{obj}}$ 的奇异值构成的对角矩阵。

e. 更新 $\mathbf{S}_0$ 中的元素得到新的样本矩阵 $\mathbf{S}_u$ 。

经过以上操作, 就产生了采样规模为 N_0 且含风速、光照强度和负荷的相关性样本矩阵 $\mathbf{S}_u$, 其中, 每一行样本数据表示对应变量的时间序列值, 而每一列样本数据则表示该场景下的风光荷数值。最后, 按照式(6)和式(8)进一步将 $\mathbf{S}_u$ 中的风速和光照强度转换为 WTG 和 PVG 出力。

3 考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划模型

3.1 目标函数

以年综合费 C_{SUM} (包括 DG 投资费 C_I 、DG 运行维护费 C_{OM} 和配电网向上级电网购电费 C_P) 最小和安全距离均衡比 V_{ERSD} 最小为目标, 用机会约束规划方法^[17]建立多目标 DG 选址定容规划模型, 具体如下:

$$\min C_{\text{SUM}} = C_I + C_{\text{OM}} + C_P =$$

$$A(d, y) \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} [(c_{i, \text{WTG}}^I S_{i, \text{WTG}}^r + c_{i, \text{PVG}}^I S_{i, \text{PVG}}^r) + (c_{i, \text{WTG}}^{\text{OM}} E_{i, \text{WTG}} + c_{i, \text{PVG}}^{\text{OM}} E_{i, \text{PVG}})] + c_P E_{\text{grid}, P} \quad (15)$$

$$\min V_{\text{ERSD}} \quad (16)$$

其中, $A(d, y) = d(1+d)^y / [(1+d)^y - 1]$ 为现值转等年值系数, d 为贴现率, y 为设备使用年限; N_{DG} 为 DG 待选安装节点个数; $c_{i, \text{WTG}}^I$ 和 $c_{i, \text{PVG}}^I$ 分别为安装在待选节点 i 的 WTG 和 PVG 的单位容量投资成本; $S_{i, \text{WTG}}^r$ 和 $S_{i, \text{PVG}}^r$ 分别为安装在待选节点 i 的 WTG 和 PVG 的额定容量; $c_{i, \text{WTG}}^{\text{OM}}$ 和 $c_{i, \text{PVG}}^{\text{OM}}$ 分别为安装在待选节点 i 的 WTG 和 PVG 的单位运行维护费; $E_{i, \text{WTG}}$ 和 $E_{i, \text{PVG}}$ 分别为安装在待选节点 i 的 WTG 和 PVG 的年发电量; c_P 为配电网向上级电网购电的单位成本; $E_{\text{grid}, P}$ 为年购电量。

3.2 约束条件

a. 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^p U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^p U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 发出的有功功率和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功需求和无功需求; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 为支路电导; B_{ij} 为支路导纳; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 电压相角差; p 为与节点 i 相关联的支路数。

b. 待选安装节点的 DG 容量约束。

$$S_{i,WTG}^r + S_{i,PVG}^r \leq S_i^{\max} \quad (18)$$

其中, $S_i^{\max}$ 为待选安装节点 i 所允许的 DG 容量上限。

c. WTG 和 PVG 容量的离散性约束。

$$\begin{cases} S_{i,WTG}^r = a_i S_{i,WTG,0}^r \\ S_{i,PVG}^r = b_i S_{i,PVG,0}^r \end{cases} \quad (19)$$

其中, $S_{i,WTG,0}^r$ 和 $S_{i,PVG,0}^r$ 分别为待选安装节点 i 的单台 WTG 和 PVG 的额定容量; a_i 和 b_i 分别为待选安装节点 i 的 WTG 和 PVG 的数量。

d. $N-1$ 安全约束。

$$V_{SD}^k \geq 0 \quad (20)$$

e. 节点电压机会约束。

$$P\{U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}\} \geq \beta_U \quad i=1, 2, \dots, p \quad (21)$$

其中, $P\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率; β_U 为满足节点电压约束的置信水平。

4 求解算法和步骤

本文采用正态边界交点 NBI(Normal Boundary Intersection) 和动态小生境差分进化算法 DNDEA(Dynamic Niche Differential Evolution Algorithm) 相结合的策略对所提选址定容规划模型进行求解。考虑到该模型属于整数非线性多目标规划问题, 该算法既充分考虑了年综合费和安全距离均衡比 2 个目标之间的互相制约关系, 避免了确定两者相对权重的主观性, 又克服了差分进化算法 DEA(Differential Evolution Algorithm) 在初期搜索速度快、后期易陷入局部最优点的缺点。

4.1 NBI

NBI 是由 Das 和 Dennis 于 1998 年提出的一种生成均匀 Pareto 前端解集的有效方法^[18-19]。其基本思想是: 首先, 利用映射矩阵将设定的权重向量映射到目标空间进行坐标变换; 然后, 将两目标空间之间的乌托邦线 N 等分, 第 q 个等分点在法向量方向进行投影形成 Pareto 曲面; 最后, 根据 Pareto 最优性条件, 即最大化法向量到 Pareto 曲面交点处的截距, 所得的解就是 Pareto 前端解集。其具有以下主要优点: 各目标函数相对独立, 可获得离散 Pareto 最优解集; 通过跟踪灵敏度曲线保证连续性算法计算效率。

4.2 DNDEA

DEA^[20] 是由 Store 和 Price 于 1995 年提出的一种群体性智能算法。DEA 的基本过程可参见文献^[20], 这里不再赘述。其基本思想是从某一随机产生的初始种群出发, 通过变异、交叉和选择等进化操作, 淘汰劣质个体、保留优良个体, 不断地进行迭代进化, 逐渐向最优解逼近, 直到满足收敛条件。

为了增加 DEA 对问题解空间的搜索性能, 引入动态小生境机制^[21], 得到 DNDEA。动态小生境机制能使得进化初期的个体都具有较大的差异, 种群拥有

非常大的多样性, 从而利于初期的全局搜索; 同时也能增强进化后期的局部搜索, 提高算法的精度^[21]。

4.3 求解步骤

基于 NBI 联合 DNDEA 的混合策略求解多目标 DG 选址定容规划模型流程见图 1。具体过程如下。

a. 置迭代次数 $i=1$ 。

b. 初始化 DNDEA 种群。按照式(22)的编码方式对 DNDEA 中的个体进行十进制编码, 随机产生 N_p 个初始个体。其中, 每个个体代表一种 DG 配置方案。

$$z = [z_1, z_2, \dots, z_{N_{DG}} \mid z_{N_{DG}+1}, z_{N_{DG}+2}, \dots, z_{2N_{DG}}] \quad (22)$$

其中, 前 N_{DG} 个变量和后 N_{DG} 个变量分别为各待选节点 WTG 和 PVG 的安装数量。

c. 计算初始种群分别相对于单目标函数 C_{SUM} 和 V_{ERSD} 的适应度值。

d. 进化操作产生新种群。本文综合运用两轮联

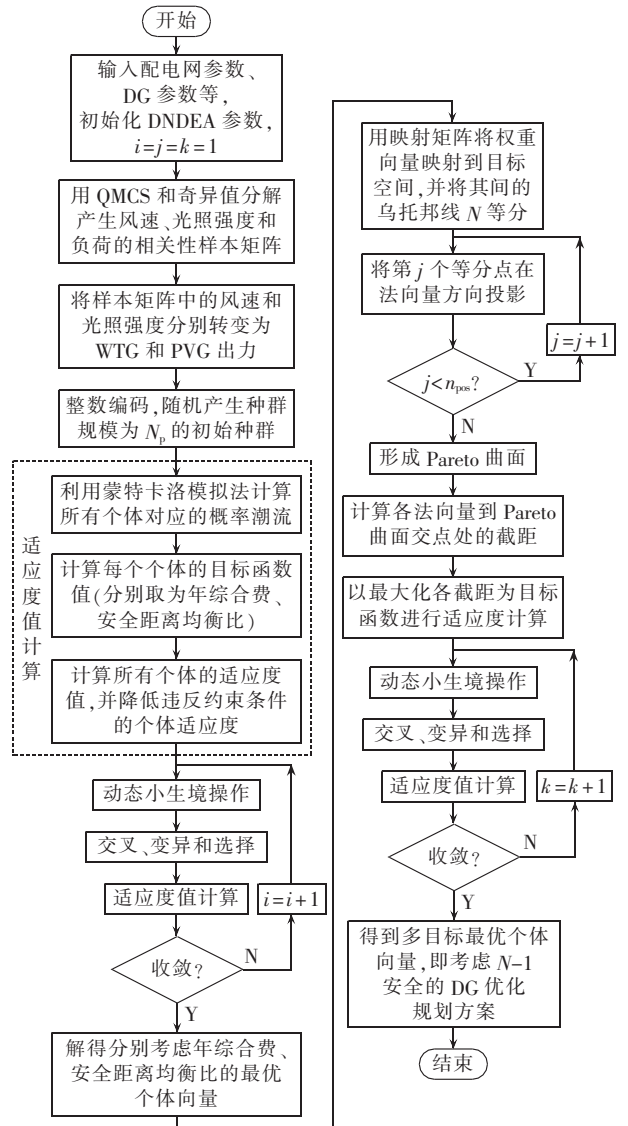


图 1 NBI 联合 DNDEA 求解规划模型流程图

Fig.1 Flowchart of planning model solver based on NBI and DNDEA

赛选择,两点交叉,单点均匀变异,交叉以及变异均采用不等概率,并引入精英保留策略和动态小生境机制。

e. 计算新种群分别相对于单目标函数 C_{SUM} 和 V_{ERSD} 的适应度值。

f. 判断 DNDEA 是否收敛,若收敛,则分别输出相对于单目标函数 C_{SUM} 和 V_{ERSD} 的结果,并退出循环;否则转步骤 d。

g. 更新迭代次数: $i=i+1$ 。

h. 用 NBI 将多目标模型式(15)—(21)转换为法向量到 Pareto 曲面交点处的截距最大化的单目标模型。

i. 仿照步骤 a—g,利用 DNDEA 求解步骤 h 中建

立的单目标模型,得到 Pareto 前端解集。

5 算例分析

5.1 算例基本情况

算例配电网如图 2 所示,共有 3 座 33 kV 变电站、6 台主变压器、20 条 11 kV 馈线和 104 个负荷节点,各节点负荷类型均相同且功率因数为 0.85。两相邻负荷节点间线路长度均为 1 km。算例中,各主变及馈线数据、联络线数据、节点负荷均值数据见表 1—3。负荷的标准差为均值的 10%。

部分规划参数如下:DG 的待选安装节点为 3、5、7、10、39、41、43、45、47 和 49,每个待选安装节点

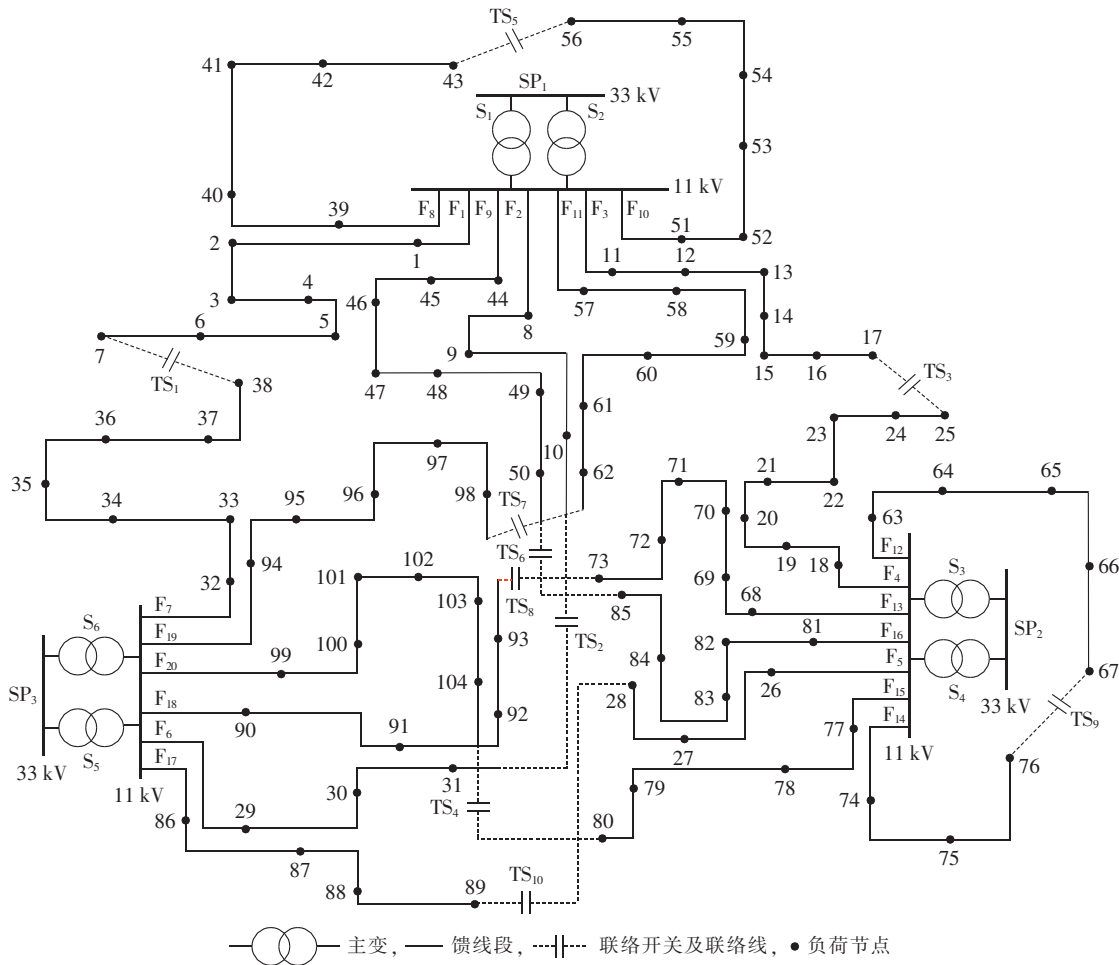


图 2 算例网络

Fig.2 Case system

表 1 各主变及馈线数据

Table 1 Data of main transformers and feeders

变电站	主变 压器	变比	容量/ (MV·A)	出口馈 线数	馈线型号	馈线容量/ (MV·A)	馈线单位电阻/ (Ω·km ⁻¹)	馈线单位电抗/ (Ω·km ⁻¹)
SP ₁	S ₁	33 kV/11 kV	12.8	4	JKLYJ-150	6.91	0.17	0.365
	S ₂	33 kV/11 kV	12.8	3	JKLYJ-150	6.91	0.17	0.365
SP ₂	S ₃	33 kV/11 kV	12.8	3	JKLYJ-150	6.91	0.17	0.365
	S ₄	33 kV/11 kV	12.8	4	JKLYJ-150	6.91	0.17	0.365
SP ₃	S ₅	33 kV/11 kV	8.0	3	JKLYJ-120	5.83	0.22	0.366
	S ₆	33 kV/11 kV	8.0	3	JKLYJ-120	5.83	0.22	0.366

表 2 联络线数据
Table 2 Data of tie lines

类型	联络线 型号	联络线单 位电阻/ ($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	联络线单 位电抗/ ($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	联络线允 许容量/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$)	联络线
1	JKLYJ-70	0.443	0.397	4.11	$\text{TS}_2,\text{TS}_5,\text{TS}_6,$ $\text{TS}_8,\text{TS}_9,\text{TS}_{10}$
2	JKLV-120	0.253	0.379	5.81	$\text{TS}_1,\text{TS}_3,\text{TS}_4,$ TS_7

表 3 节点负荷均值数据
Table 3 Data of nodal average loads

节点数	负荷节点	平均负荷/($\text{MV}\cdot\text{A}$)
14	1—4,18—20,32,44—47,68,94	0.4435
24	11—13,33—36,51—53,57—59, 63—65,69—71,95—97,99,100	0.2956
6	48,49,72,73,98,101	0.4069
12	14,15,21—23,37,54,60—62,102,103	0.2712
6	8—10,29,43,90,	0.8150
20	26—28,74—88,91,92	0.3260
8	30,31,39—42,89,93	0.6113
14	5—7,16,17,24,25,38,50,55,56, 66,67,104	0.3357

所允许安装的 DG 容量上限为 2 MW。单台 WTG 的额定容量为 0.5 MW,切入风速、额定风速、切出风速分别为 3、13、20 m/s;WTG 的单位容量投资费为 1 500 000 $\text{\$/MW}$,单位发电量的运行维护费用为 30 $\text{\$/(\text{MW}\cdot\text{h})}$;风速服从 $r=2.15$ 和 $c=8.32$ 的 Weibull 分布。单个 PVG 的额定容量为 0.5 MW,额定光照强度为 0.5 kW/m^2 ,最大光照强度为 0.6 kW/m^2 ;PVG 的单位容量投资费为 1 750 000 $\text{\$/MW}$,单位发电量的运行维护费为 40 $\text{\$/(\text{MW}\cdot\text{h})}$;光照强度服从 $\alpha=0.55$ 和 $\beta=1.38$ 的 Beta 分布。WTG 和 PVG 的使用年限均为 20 a,贴现率为 0.06。置信水平 $\beta_0=0.95$;节点电压所允许的范围为 0.95~1.05 p.u。配电网向上级电网购电的单位成本为 50 $\text{\$/(\text{MW}\cdot\text{h})}$ 。NBI 的参数为:等分点个数为 20。DNDEA 的参数为:最大迭代次数为 50,种群规模为 100,缩放因子和交叉率均从 0.9 线性递减到 0.1。

基于相关性样本数据,图 3 给出了该配电网所在区域的风速、光照强度和负荷(标么值)的年变化曲线。本文所有仿真的计算条件是:计算机 CPU 为 i7-3820,主频为 3.6 GHz,内存为 8 GB,在 MATLAB 2013a 平台上编制计算程序。

5.2 算例计算结果及分析

将本文所提出的模型用于算例研究,并采用 NBI 联合 DNDEA 对规划模型进行求解,得到考虑 $N-1$ 安全的 DG 最优规划方案如表 4 所示。作为对比,表 4 中同时给出了不考虑 $N-1$ 安全,即仅以年综合费最小为目标函数的 DG 规划结果。

由表 4 可以看出,DG 规划模型中考虑 $N-1$ 安

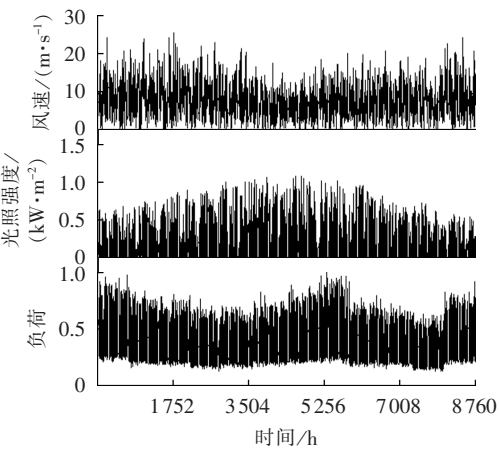


图 3 风速、光照强度和负荷的年变化曲线
Fig.3 Curves of annual wind speed, illumination intensity and load

表 4 DG 最优规划方案
Table 4 Optimal DG planning schemes

方法	DG 最优规划 方案	年综合 费/ $\text{\$}$	安全距 离均值/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$)	安全距离 均衡度/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$) ²	安全距离 均衡比/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$)
不考虑 $N-1$ 安全	7(1,0),10(2,1), 41(1,0),43(1,1), 49(1,0)	18 398 000	2.141	1.729	0.807
考虑 $N-1$ 安全	5(2,0),7(3,1), 47(1,0),49(1,1)	18 500 000	2.163	1.522	0.704

注:7(1,0)表示节点 7 安装 1 台 WTG,没有安装 PVG,其他依此类推。

全将会对结果产生影响,而综合考虑配电网经济性、安全性,本文所提出的模型更优。解释其原因如下:从安全性角度来看,较不考虑 $N-1$ 安全模型,本文模型所得 DG 规划方案的安全距离均值大了 1.02%,表明安全裕度平均水平较大;安全距离均衡度小了 11.97%,表明净负荷分布更加平均,各主变、馈线负载率更均衡,安全距离均衡比小了 12.76%,综合说明系统安全性更好;从经济性角度来看,相比于不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,本文模型所得规划方案虽需多安装 1 台 WTG,但年综合费较之相当,仅多出 0.55%;综合考虑经济性、安全性,由于年综合费和安全距离均衡比的量纲不同,这里采用百分比大小比较对不同方案优劣性进行评价,考虑到本文模型所得 DG 规划方案的安全距离均衡比小了 11.97%,年综合费仅多了 0.55%,兼顾系统经济性、安全性,本文模型更优。

5.3 $N-1$ 安全下的 DG 配置作用分析

为了分析 $N-1$ 安全下的 DG 作用,本文比较了 DG 规划前、不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划和考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划 3 种情景所对应配电网中各条安全距离情况,具体如图 4 所示。

由图 4 可看出,对于 DG 规划前,第 1 条和第 16 条安全距离为负值,由于安全距离的大小与主变容

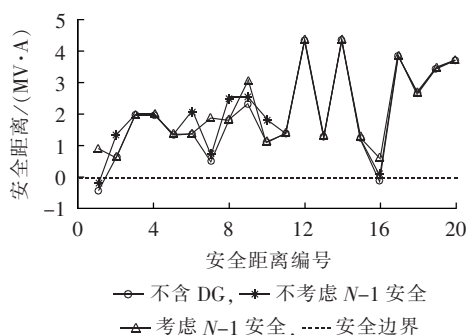


图 4 安全距离情况

Fig.4 Security distances

量、馈线容量和馈线负荷水平三者的匹配有关,说明此时馈线段 F_1 和馈线段 F_{16} 的负荷较重,与之相比,第 12 和 14 条安全距离为正值且相差很大,说明原配电网负荷分布不均,局部馈线负荷重、轻载情况较为严重;对于不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,第 16 条安全距离变为正值,说明配电网中各馈线负荷重、轻载情况有所改善,分析其原因是由于在节点 49 接入了一台 WTG,使得由馈线段 F_9 和馈线段 F_{16} 构成的联络净负荷水平下降,第 16 条安全距离增大。然而,第 1 条安全距离依旧为负值,说明经 DG 规划后,仍不满足 $N-1$ 安全的要求,仅是系统经济性得到了优化改善;而对于考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,不仅使第 1 条和第 16 条安全距离均变为正值,满足了 $N-1$ 安全准则,而且配电网中各安全距离均值水平、均衡度均得到了相应改善,全网安全裕度水平得到了提高。

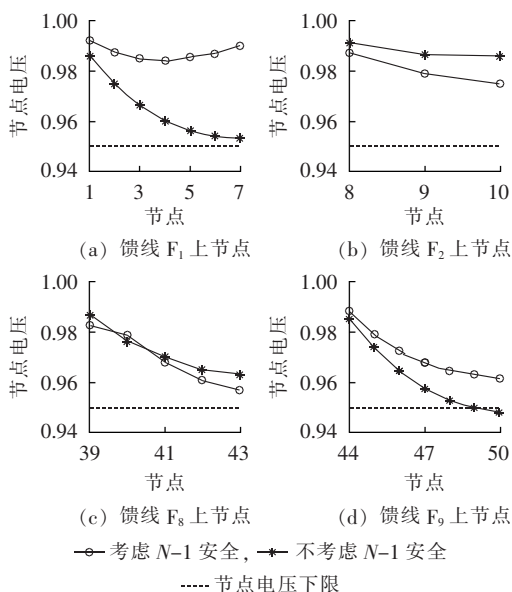
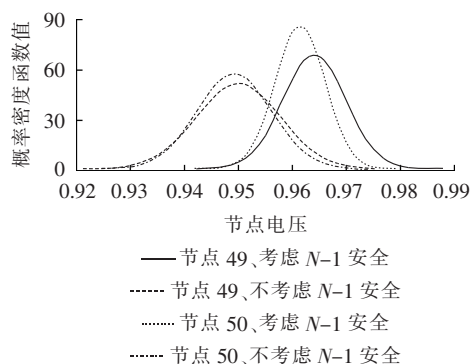
需说明的是,第 11 条到第 15 条安全距离在考虑 $N-1$ 安全前后未发生改变是由于本文选取的 DG 待选安装节点没有位于这些馈线或与这些馈线联络的馈线上,若需改善,仅需扩充 DG 待选安装节点集并建模求解,这里不再赘述;同时,各安全距离没有彻底实现均衡是由算例电网拓扑结构不对称及各主变、馈线容量和馈线负荷存在差异性共同导致的。

在不考虑 $N-1$ 安全和考虑 $N-1$ 安全 2 种规划情景下,分别对算例系统中的各节点电压水平进行校验。非 DG 待选安装馈线段上的各节点电压均在允许范围内,而 DG 待选安装馈线段 F_1 、 F_2 、 F_8 和 F_9 上的各节点电压水平如图 5 所示,图中节点电压为标幺值,后同。

由图 5 可以看出,对于不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,节点 49、50 的电压低于节点允许电压下限,而与之相较,考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划能保证各节点电压均在允许上下限内。因此,考虑 $N-1$ 安全有助于提高满足节点电压机会约束的概率。

为进一步分析节点 49 和 50 的电压越限概率,图 6 给出了节点 49 和 50 的电压概率分布曲线。

由图 6 可以看出,考虑 $N-1$ 安全下的节点 49 和 50 的电压期望值分别为 0.964 0 p.u. 和 0.961 3 p.u.,

图 5 有无考虑 $N-1$ 安全的各节点电压水平Fig.5 Comparison of nodal voltage between schemes with and without $N-1$ security图 6 有无考虑 $N-1$ 安全的节点 49 和 50 电压概率分布Fig.6 Comparison of voltage probability distribution between schemes with and without $N-1$ security for Node 49 and 50

满足节点电压约束下限,但不考虑 $N-1$ 安全下的节点 49 和 50 的电压越下限概率分别达到 51% 和 55%。因此,不考虑 $N-1$ 安全会增加系统运行的风险。而考虑 $N-1$ 安全使得节点 49 和 50 的电压方差减小,概率分布较好地满足了机会约束。

此外,由表 4 和图 4、图 5 可以看出,就馈线层面而言,对于不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,第 1 条安全距离为负是由于在馈线段 F_1 上仅配置了 0.5 MW 的 DG,而对于考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,第 1 条安全距离为正值是通过在馈线段 F_1 上配置 3 MW 的 DG;就节点层面而言,对于不考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,存在 2 个不满足电压约束的节点是由于仅在馈线段 F_9 上的节点 49 接入了 0.5 MW 的 DG,而对于考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划,所有节点均满足电压约束是由于馈线段 F_9 上共配置了 1.5 MW 的 DG,其中,

节点 49 接入了 1 MW 的 DG。综上,说明通过将安全距离均衡比引入目标函数,具有指导 DG 选址定容以优化系统安全性的作用。分析其原因如下:DG 规划前,馈线负载率高的馈线,其安全距离小;馈线负载率低的馈线,其安全距离大,而将安全距离均衡比作为目标函数纳入 DG 规划模型,通过 DG 的选址定容,改善各节点净负荷分布,使得各条安全距离更加均衡,系统安全性更好。

与本文模型相比,传统以经济性最优的选址定容规划模型,DG 接入供电路径较短线路的概率较大,若此时线路轻载,则线路节点电压越上限的概率大幅增加,加之 DG 接入容量不适宜,配电网潮流反向,安全距离随 DG 出力的增加而减小甚至越过安全边界,使得系统 $N-1$ 安全无法保障。可见,在保证系统经济性的前提下,考虑 $N-1$ 安全的 DG 规划具有重要意义。

5.4 算法效率分析

为衡量算法寻优的效率及鲁棒性,在相同种群规模下,分别采用 PSO 算法、GA、DEA 和 DNDEA 求解第 3 节中模型 50 次,所得最小年综合费 $C_{\text{SUM}}^{\min}$ 、平均年综合费 $\bar{C}_{\text{SUM}}$ 、最小安全距离均衡比 $V_{\text{ERSD}}^{\min}$ 、平均安全距离均衡比 $\bar{V}_{\text{ERSD}}$ 、达到 $C_{\text{SUM}}^{\min}$ 和 $V_{\text{ERSD}}^{\min}$ 次数 N_1 、平均迭代次数 N_2 、平均计算时间 $\bar{t}$ 列于表 5 中。其中,PSO 算法的参数为:最大迭代次数为 50,粒子数为 100,惯性权重从 0.9 线性递减到 0.1,局部与全局学习因子为 2,粒子最大移动距离为 5。GA 的参数为:最大迭代次数为 50,染色体数为 100,交叉率从 0.9 线性递减到 0.1,变异率从 0.09 线性递减到 0.01,采用轮盘赌选择机制。

表 5 各算法收敛特性对比
Table 5 Comparison of convergence performances among various algorithms

算法	$C_{\text{SUM}}^{\min}/\text{\$}$	$\bar{C}_{\text{SUM}}/\text{\$}$	$V_{\text{ERSD}}^{\min}/(\text{MV}\cdot\text{A})$	$\bar{V}_{\text{ERSD}}/(\text{MV}\cdot\text{A})$	N_1	N_2	$\bar{t}/\text{s}$
DNDEA	18500000	18556000	0.704	0.715	22	27.5	1053.8
DEA	18519000	19025000	0.713	0.731	13	35.5	1185.6
PSO	18530000	19084000	0.714	0.738	12	36.5	1198.1
GA	18532000	19448000	0.722	0.743	6	43.0	1446.2

由表 5 可以看出,4 种算法所得结果相近,但 DNDEA 达到 $C_{\text{SUM}}^{\min}$ 和 $V_{\text{ERSD}}^{\min}$ 的次数 N_1 明显高于其他 3 种算法,平均迭代次数 N_2 和平均计算时间 $\bar{t}$ 则低于其他算法,这表明本文采用的 DNDEA 具有较高的寻优效率。此外,相比其他 3 种算法,DNDEA 能够高效寻优的原因在于其引入了动态小生境机制,极大地增加了全局寻优能力。

6 结论

本文丰富了系统不确定性的内涵,提出了一种考

虑 $N-1$ 安全的多目标 DG 选址定容规划模型。所得 DG 规划方案实现了兼顾系统经济性、安全性下的最优,具有合理性和精度高的特点,可用于指导安全裕度要求较高的 DG 规划。本文得到的主要结论如下:

a. 考虑 DG 出力低差异性和相关系数矩阵非正定,利用准蒙特卡洛模拟和奇异值分解生成风光荷相关性样本矩阵,以同时计及 DG 出力及时变负荷带来的不确定性及相关性;

b. 以年综合费最小和安全距离均衡比最小为目标的 DG 规划模型,能够保证 $N-1$ 安全,实现了系统经济性、安全性的综合优化;

c. 本文采用的 NBI 联合 DNDEA 求解模型是有效的且寻优效率高于同样规模的 PSO 算法和 GA。

参考文献:

[1] NAGATA T,SASAKI H,YOKOYAMA R. Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1995,10(3): 1473-1479.

[2] 李振坤,田源,董成明,等. 基于随机潮流的含电动汽车配电网内分布式电源规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):60-66.
LI Zhenkun,TIAN Yuan,DONG Chengming,et al. Distributed generators programming in distribution network involving vehicle to grid based on probabilistic power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(16):60-66.

[3] SHAYANI R A,DE OLIVEIRA M A G. Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(3):1625-1631.

[4] ATWA Y M,EL-SAADANY E F,SALAMA M M A,et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):360-370.

[5] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.

[6] LIU Z,WEN F,LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4): 2541-2551.

[7] 张沈习,陈楷,龙禹,等. 基于混合蛙跳算法的分布式风电源规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):76-82.
ZHANG Shenxi,CHEN Kai,LONG Yu,et al. Distributed wind generation planning based on shuffled frog leaping algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):76-82.

[8] 白晓清,赵瞻,鲍海波. 基于 CLARA 算法的考虑时序特性分布式电源规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):14-22.
BAI Xiaoqing,ZHAO Zhan,BAO Haibo. DG planning based on CLARA algorithm with consideration of timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):14-22.

[9] 夏叶,康重庆,宁波,等. 用户侧互动模式下发用电一体化静态安全校核[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):35-41.
XIA Ye,KANG Chongqing,NING Bo,et al. Generation and load integrated static security checking on interaction mode on cus-

- tomers side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 35-41.
- [10] XIAO J, ZU G, GONG X, et al. Model and topological characteristics of power distribution system security region[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 2014(6): 1-13.
- [11] XIAO J, ZU G, GONG X, et al. Observation of security region boundary for smart distribution grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1731-1738.
- [12] 刘佳, 程浩忠, 肖峻, 等. 计及 $N-1$ 安全准则的智能配电网多目标重构策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 9-15.
- LIU Jia, CHENG Haozhong, XIAO Jun, et al. A multi-objective reconfiguration strategy for smart distribution network considering $N-1$ security criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 9-15.
- [13] 赵渊, 何媛, 宿晓岚, 等. 分布式电源对配网可靠性的影响及优化配置[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 13-20.
- ZHAO Yuan, HE Yuan, SU Xiaolan, et al. Effect of distributed generation on power distribution system reliability and its optimal allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 13-20.
- [14] ZHANG S, CHENG H, ZHANG L, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3215-3225.
- [15] SINGHEE A, RUTENBAR R. Why quasi-Monte Carlo is better than Monte Carlo or Latin hypercube sampling for statistical circuit analysis[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2010, 29(11): 1763-1776.
- [16] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于非参数核密度估计的扩展准蒙特卡洛随机潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 21-27.
- FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. An extended quasi Monte Carlo probabilistic load flow method based on non-parametric kernel density estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 21-27.
- [17] 周辛南, 柯德平, 孙元章. 基于配电网静态电压质量机会性约束的可再生能源分布式发电容量规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 143-149.
- ZHOU Xinnan, KE Deping, SUN Yuanzhang. DG planning based on chance constraint of distribution network static voltage quality for renewable energies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 143-149.
- [18] ROMAN C, ROSEHART W. Evenly distributed Pareto points in multi-objective optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 1011-1012.
- [19] MAVALIZADEH H, AHMADI A, HEIDARI A. Probabilistic multi-objective generation and transmission expansion planning problem using normal boundary intersection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 9(6): 560-570.
- [20] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [21] DELLA C A, DE STEFANO C, MARCELLI A. Where are the niches? Dynamic fitness sharing[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(4): 453-465.

作者简介:



刘佳

刘佳(1991—),男,河南商丘人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化规划、运行(E-mail: liujia911011@126.com);

徐谦(1963—),男,浙江宁波人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划和运行;

程浩忠(1962—),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量。

Multi-objective coordinated DG planning with $N-1$ security

LIU Jia¹, XU Qian², CHENG Haozhong¹, LAN Zhou², MA Zeliang³, ZHU Zhonglie³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Economic Research Institute, Hangzhou 310008, China; 3. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: Since the existing planning model of distributed wind-turbine and photovoltaic generations DGs (Distributed Generations) does not take the $N-1$ constraint of main transformers and feeders into account, the obtained planning scheme may not satisfy the security requirement, for which, a multi-objective planning model with $N-1$ security is proposed for the siting and sizing of DGs. The method and indexes of $N-1$ security evaluation are introduced based on the security distance model. The quasi Monte Carlo simulation and singular value decomposition are adopted to generate the correlation sample matrix among wind speed, light intensity and load for improving the accuracy of planning results. The chance-constrained programming method is applied to build the DG planning model with the minimum annual comprehensive cost and the minimum security distance equilibrium ratio as its optimization objectives and the dynamic niche differential evolution algorithm, combined with the normal boundary intersection, is adopted to solve the model. Case results show the DG siting and sizing scheme obtained ensures the $N-1$ security and realizes the optimal system economy and security, proving the rationality and effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: smart distribution grid; distributed generation; siting and sizing; $N-1$ security; dynamic niche differential evolution algorithm; models