

基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用

黄红程¹, 顾洁¹, 方陈²

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

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 200437)

摘要: 随着以风电、光伏为代表的不可控型分布式电源在配电网中的渗透率日益提高, 分布式电源出力的不确定性成为配电网重构中必须考量的重要因素。因此建立了以系统网损最小为目标, 计及潮流方程、节点电压、支路潮流和配电网开环运行约束的配电网重构随机优化模型。模型以机会约束描述节点电压和支路潮流约束, 采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛法随机潮流进行检验。提出了基于无向生成树的并行遗传算法以实现配电网重构模型的并行求解。IEEE 33 节点系统的测试结果验证了模型的合理性, 并将所提出的算法与基于无向生成树的遗传算法、粒子群优化算法、蚁群搜索算法和改进和声搜索算法进行比较, 验证了其高效性。

关键词: 配电网重构; 生成树; 遗传算法; 并行算法; 随机模型; 概率潮流; 拉丁超立方采样; 机会约束

0 引言

针对配电网重构问题, 国内外已经取得了一定的研究成果。含分布式电源(DG)的配电网重构模型大致可分成两大类: ①确定性模型, 即将 DG 视为出力恒定或出力可控的电源^[1], 并以“负负荷”的形式处理^[2]。这类模型并未考虑分布式电源出力变化, 不适用于不可控型分布式电源; ②概率模型, 即采用概率统计的方式来描述 DG 出力的不确定性。

文献[3-6]采用机会约束形式来描述风机、光伏、负荷或电动汽车的随机性, 并以蒙特卡洛模拟或者基于半不变量的随机潮流方式进行潮流计算。这类方法能较好地衡量 DG 出力的随机特性, 但因采用了随机潮流, 计算量较大, 计算用时也随问题规模的增加而显著增加。目前, 配电网重构求解算法的研究成果集中在启发式算法的改进方面, 即通过算法改进来保证迭代过程中解的拓扑可行性^[7-10]或者快速检测并剔除不可行解^[11]。

然而上述算法并没有针对配电网重构概率模型中计算规模较大这一特点进行特定优化, 在求解配电网重构概率模型时仍然存在计算时间过长的的问题。在当前计算资源正朝着多核化、集群化发展的趋势下, 如何将并行计算引入配电网重构模型的求

解中值得研究。文献[12]提出了适用于配电网重构的并行禁忌算法, 但是并未给出计算量较大的情况下性能测试结果。总体而言, 关于并行计算在配电网重构概率模型求解的研究目前还很少。

上述背景下, 本文首先将无向生成树与遗传算法相结合, 得到了基于无向生成树的遗传算法(STGA), 在此基础上引入“迁移算子”将 STGA 改造成具有并行计算能力的基于无向生成树的并行遗传算法(parallel-STGA, PSTGA); 然后建立了以系统网损的数学期望最小为目标, 计及潮流方程约束、节点电压和支路潮流机会约束、配电网开环运行约束的配电网重构随机模型; 最后, 以 IEEE 33 节点配电网系统为例验证了上述模型的合理性, 并与 STGA、粒子群优化算法(PSO)、蚁群搜索算法(ACS)和改进和声搜索算法(IHSA)的结果进行比较, 从而验证了 PSTGA 的高效性。

1 基于无向生成树的并行遗传算法

配电网重构问题通常采用人工智能算法求解, 并以改进遗传算法和改进粒子群优化算法最为广泛。考虑到传统的遗传算法在求解配电网重构问题时存在拓扑不可行和遗传率低等问题, 文献[13]将图论中生成树与遗传算法相结合, 具有一定借鉴意义, 但是采用有向图来描述网络拓扑结构主要存在如下问题: ①有向图中方向可能与 DG 接入后潮流实际流向不符, 不具有实际物理意义; ②采用有向图

描述拓扑使得待搜索空间扩大一倍,因而降低了算法搜索效率;③使用有向图描述拓扑会对种群多样化产生不利影响,可能引起“早熟”问题。因此,本文将生成树定义为无向图,通过重新定义相应遗传算子,得到STGA;通过引入迁移算子,将STGA改造成可并行计算的PSTGA。

1.1 改进遗传算子

为保证整个迭代过程中产生的染色体均满足拓扑上连通及辐射状运行,不构成环网,故重新定义初始化操作、交叉算子以及变异算子。

1) 始化操作

初始化操作借鉴了图论中“避圈法”的思想^[14],保证了初始种群中所有染色体均拓扑可行,即拓扑连通且不存在环网,主要步骤简述如下。

步骤 1:将所有含开关的支路随机排列,得到待选支路序列。

步骤 2:在待选支路序列中选出根节点(变电站)所在支路,放入子集 S_1 。

步骤 3:依次将待选支路序列中的可选支路按照一定规则放入相应的子集。设某待选支路 b_i 两端点为 N_{fi} 和 N_{ti} ,则操作规则为:①若现有子集 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 均不包含节点 N_{fi} 或者 N_{ti} ,则新建子集 $S_{m+1} = \{N_{fi}, N_{ti}\}$;②若现有子集 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 中存在子集 S_k 仅包含一节点(如节点 N_{fi}),则将另一节点(即节点 N_{ti})追加至该子集 S_k ;③若现有子集 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 中存在子集 S_k ,同时包含节点 N_{fi} 和 N_{ti} ,则忽略该支路;④若现有子集 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 中存在子集 S_j 和 S_k ,分别包含节点 N_{fi} 或者 N_{ti} (如 $N_{fi} \in S_j, N_{ti} \in S_k$),则合并子集 S_j 和 S_k 。

步骤 4:判断是否满足终止条件,即所有子集节点数是否等于配电网节点总数。若不满足,则返回步骤 3。

2) 交叉算子

交叉算子的实现算法为:随机选择节点 N_1 与 N_2 ,使得 $N_1 \neq N_2$;在父代生成树的 T_1 与 T_2 中通过深度优先搜索(DFS)分别确定 N_1 与 N_2 之间的无向路径。设 T_1 中的路径为 P_1 , T_2 中的路径为 P_2 ;分别对 T_1, P_2 和 T_2, P_1 进行交叉操作,得到新个体 T_1^* 与 T_2^* 。图 1 为 PSTGA 遗传操作(交叉和变异)流程。

图 1(a)以 T_1 和 P_2 交叉为例,给出了交叉算子的操作流程。通过上述操作步骤得到的新个体,能够确保交叉操作产生的个体均为拓扑连通的可行解。

3) 变异算子

变异算子的实现算法为:从可选支路集中随机

选取一条支路 N_1N_2 ;若父代拓扑 T 包含支路 N_1N_2 ,则重新选取支路 N_1N_2 ,反之则通过 DFS 找出端点 N_1 和 N_2 之间的无向路径 P ;随机选取 P 中的任意一条支路,将其删除,同时在 T 中增加支路 N_1N_2 ,从而产生新个体 T^* 。具体流程如图 1(b)所示。

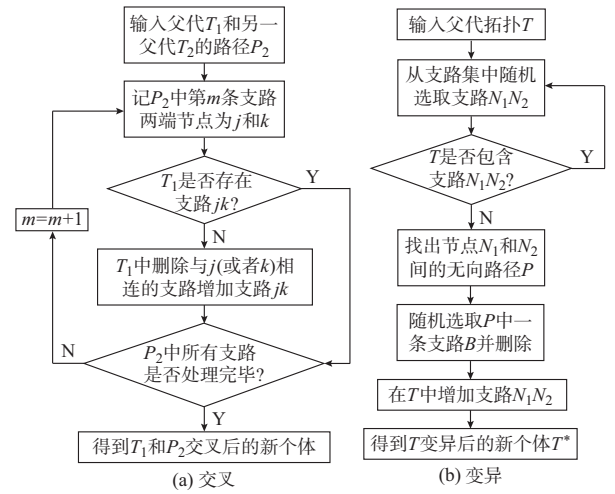


图 1 PSTGA 遗传操作流程
Fig.1 Flow chart of PSTGA genetic operations

1.2 并行计算的实现

文献[15]从理论上证明了粗粒度并行遗传算法依概率 1 收敛于全局最优解。本文以此为基础,在STGA中引入类似的迁移算子,从而得到适用于并行计算的PSTGA。

PSTGA 中并行计算部分步骤为:首先将所有染色体(近似)等分成 N_{sub} 个子种群;然后并行地按照STGA中定义的遗传算子对各个子种群进行选择、交叉和变异操作;接着产生一个 $1 \sim N_{sub}$ 的随机排列 $p = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{sub}}]$,从而建立目标子种群 i 与源子种群 p_i 间的映射关系;最后通过“迁移算子”将各个目标子种群的最差个体替换为相应的源子种群的最优个体。以 $N_{sub} = 4$ 为例,设产生的随机排列为 $p = [4, 3, 2, 1]$,则上述操作流程如图 2 所示。

2 配电网重构模型中不确定性因素的处理

2.1 分布式风机出力随机模型

通常某段时间内风电场的风速服从两参数 Weibull 分布,分布式风机输出有功功率与风速之间的关系可以用分段线性函数表示^[16]。

本文将分布式风机简化处理为 PQ 节点,即

$$Q_w = -P_w \tan(\arccos \lambda) \tag{1}$$

式中: P_w 和 Q_w 分别为风机有功出力和无功出力; λ 为功率因数。

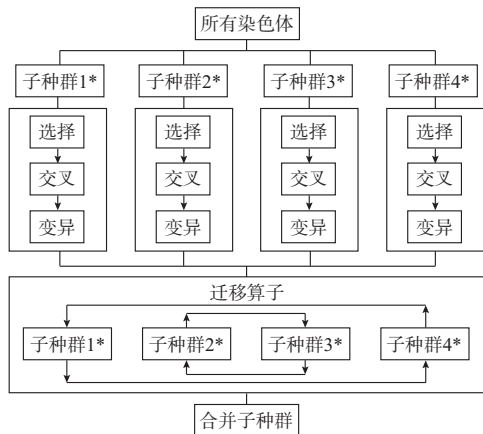


图2 PSTGA 并行部分流程

Fig.2 Flow chart of PSTGA parallelization

2.2 光伏发电随机模型

太阳辐照强度具有随机性,一般采用 Beta 分布近似模拟一段时间内太阳辐照强度的概率分布,光伏阵列一般由多块太阳能电池组件构成,其输出有功功率为:

$$P_m = rMA\eta \quad (2)$$

式中: P_m 为光伏阵列输出有功功率; r 为单位面积上太阳辐照强度; M 为光伏阵列中太阳能电池组件个数; A 为每个太阳能电池组件面积; η 为光伏阵列的光电转换效率。

考虑到光伏阵列可由电容器组来保证功率因数基本为一常数,因此在潮流计算中可视为 PQ 节点^[16]。

2.3 负荷随机模型

一般采用正态分布来反映电力系统负荷的不确定性,其有功功率与无功功率满足的概率密度函数为:

$$\begin{cases} f(P_{L,i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P,i}} \exp\left(-\frac{(P_{L,i} - \mu_{P,i})^2}{2\sigma_{P,i}^2}\right) \\ f(Q_{L,i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Q,i}} \exp\left(-\frac{(Q_{L,i} - \mu_{Q,i})^2}{2\sigma_{Q,i}^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 处有功负荷和无功负荷; $\mu_{P,i}$ 和 $\sigma_{P,i}$ 分别为节点 i 处有功负荷期望和标准差; $\mu_{Q,i}$ 和 $\sigma_{Q,i}$ 分别为节点 i 处无功负荷期望和标准差。

2.4 基于蒙特卡洛模拟的随机潮流

为了计及配电网中分布式风机、光伏发电系统出力随机性以及负荷的不确定性,需要采用随机潮流来计算配电网潮流分布。目前,随机潮流的计算方法主要包括解析法和模拟法两大类^[17]。其中解析法有半不变量法^[16-17]、点估计法^[18]等,而模拟法主要是蒙特卡洛法。考虑到解析法计算随机潮流相

对繁琐,而传统的蒙特卡洛法存在采样次数随计算精度的提高而剧增的问题,故本文采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛法(LHS-MCS)进行随机潮流的计算。拉丁超立方采样详见文献[19]。

基于 LHS-MCS 的配电网随机潮流计算流程如下。

1) LHS 采样。按照文献[19]所提出的方法对待采随机变量(风速、太阳辐照强度和负荷有功/无功功率)进行采样,得到采样矩阵 S_{LHS} 。

2) 潮流计算。从采样矩阵 S_{LHS} 中按列依次取出一组采样值代入潮流方程,求出节点电压、支路电流以及系统网损 $P_{Loss,i}$ ($i = 1, 2, \dots, N_{LHS}$), 其中 N_{LHS} 为 LHS 采样次数。

3) 统计处理。计算潮流结果的概率分布,得到系统网损均值;判断是否满足节点电压、支路潮流约束,并以惩罚项的形式计入目标函数值。

3 基于 PSTGA 的配电网重构数学模型

基于 PSTGA 的配电网重构数学模型充分考虑了分布式风机、光伏发电系统出力的不确定性,采用概率统计的方法进行建模;目标函数为系统网损的数学期望最小,可以通过 LHS-MCS 计算得到;约束条件主要考虑潮流方程约束、节点电压约束、支路潮流约束以及网络拓扑约束,其中节点电压和支路潮流约束均以机会约束的形式给出。

3.1 目标函数

以系统网损的数学期望最小为目标建立考虑机会约束的配电网重构数学模型,即

$$\min P_{Loss} = E\left(\sum_{k=1}^{N_L} P_{k, Loss}\right) \approx \frac{1}{N_{LHS}} \sum_{i=1}^{N_{LHS}} \sum_{k=1}^{N_L} I_{i,k}^2 r_k \quad (4)$$

式中: P_{Loss} 为系统网损期望值; E 为计算随机变量的数学期望; N_L 为系统支路数; $P_{k, Loss}$ 为随机变量,对应于第 k 条支路上损耗; $I_{i,k}$ 为第 i 次采样中流过第 k 条支路的电流, $i = 1, 2, \dots, N_{LHS}$; r_k 为第 k 条支路电阻, $k = 1, 2, \dots, N_L$ 。

3.2 约束条件

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{i,s} = V_i \sum_{j \in \Omega_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{i,s} = V_i \sum_{j \in \Omega_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{i,s}$ 和 $Q_{i,s}$ 分别为节点 i 处注入有功功率和无功功率; V_i 为节点 i 处电压幅值; Ω_i 表示与节点 i 相连的其他节点集合; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 间相角差; $i, j = 1,$

2,⋯,N,其中N为节点总数。

2)节点电压约束

$$P_r\{V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}\} \geq \beta_U \tag{6}$$

式中: P_r 为事件成立概率; $V_i^{\max}$ 和 $V_i^{\min}$ 分别为节点*i*处电压幅值的上下限, $i \in \Theta$,其中 Θ 为系统节点集合; β_U 为电压约束的置信水平。

3)支路潮流约束

$$P_r\{|P_j| \leq P_j^{\max}\} \geq \beta_l \tag{7}$$

式中: $P_j^{\max}$ 为第*j*条支路传输有功功率的上限, $j \in \Delta$,其中 Δ 为系统支路集合; β_l 为支路潮流约束的置信水平。

4)网络拓扑约束

$$g \in G \tag{8}$$

式中: g 为当前网络拓扑结构; G 为所有满足辐射状结构的网络拓扑集合。

3.3 基于 PSTGA 的配电网重构模型的求解

以某一可行网络拓扑方案中闭合开关的编号作为一条染色体 $x=[x_1,x_2,\cdots,x_d]$, d 为可行拓扑方案应闭合开关总数,采用 PSTGA 来求解考虑机会约束的配电网重构模型的完整流程如图 3 所示。

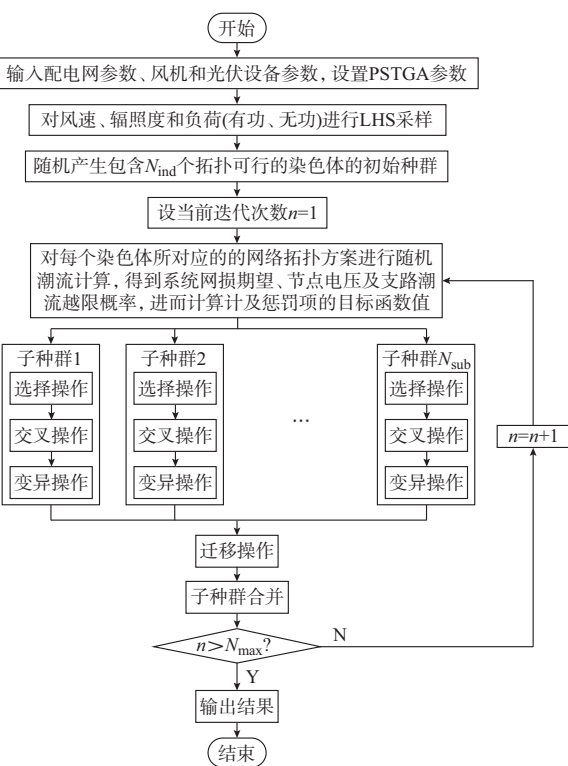


图 3 PSTGA 求解配电网重构模型流程
Fig.3 Flow chart of network reconfiguration solution based on PSTGA

步骤简述如下。

步骤 1:参数设置。读取网络参数以及风机、光伏设备参数,设定算法相关参数,包括最大迭代次数

$N_{\max}$ 、染色体总数 N_{ind} 、子种群数 N_{sub} 、选择概率 P_s 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 和 LHS 采样次数 N_{LHS} 。

步骤 2:LHS 采样。对风速、辐照强度和负荷(有功和无功功率)进行 LHS 采样,得到采样矩阵 S_{LHS} 。

步骤 3:初始化种群。随机生成 N_{ind} 条拓扑可行的染色体作为初始种群 $P=\{x_1,x_2,\cdots,x_{N_{\text{ind}}}\}$,其中第 i 条染色体代表问题的解为 $x_i=[x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{id}],i=1,2,\cdots,N_{\text{ind}}$ 。

步骤 4:适应度计算。就每个染色体个体所对应的网络拓扑方案,计算随机潮流,得到系统网损期望、节点电压及支路潮流越限概率,对于违反机会约束的方案进行惩罚,得到对应的目标函数值,进而计算出每条染色体个体的适应度。

步骤 5:遗传操作。将染色体(近似)等分成 N_{sub} 个子种群,并按照 PSTGA 的算子定义,以并行方式对每个子种群依次进行选择、交叉和变异操作,得到新染色体个体。

步骤 6:迁移操作。随机确定源子种群与目标子种群间的映射关系,并按照 PSTGA 迁移算子的定义,用源种群中的最优个体替换目标种群中的最差个体。

步骤 7:子种群合并。将 N_{sub} 个子种群合并,并根据适应度值,确定当前最优染色体及最优值。

步骤 8:终止判断。若迭代次数 n 未达最大迭代次数 $N_{\max}$,则 $n=n+1$,转步骤 4,反之,输出结果。

4 算例分析

以 IEEE 33 节点系统为例验证本文所建立含分布式风机和光伏的配电网重构模型的合理性,并通过与 STGA,PSO^[10],IHSA^[8] 和 ACS^[9] 在稳定性、收敛速度、计算耗时等方面的性能进行比较,验证 PSTGA 的有效性。

4.1 算例参数

IEEE 33 节点系统的拓扑如图 4 所示,阻抗和负荷等参数详见文献[9]。假定系统各节点的负荷(有功负荷和无功负荷)均服从方差为 $0.1\mu_L$ 正态分布,其中 μ_L 为负荷期望。采用丹麦 Bonus 1 MW/54 型风机,其切入风速为 3 m/s;额定风速为 14 m/s;切出风速为 25 m/s;额定功率为 200 kW;功率因数为 0.9;Weibull 分布的尺度参数为 9.49,形状参数为 1.99。光伏阵列采用 Pilkington SFM144Hx250wp 型太阳能电池组件,包含组件个数为 400;组件面积为 2.16 m^2 ;光电效率为 13.44%;额定功率为 100 kW;功率因数为 0.9;Beta 分布的形状参数为 1.44 和 5.21。假定分别在节点

25 和节点 30 处安装 2 台风机,在节点 14 处安装 4 个光伏阵列。节点电压允许范围为 0.93~1.07 (标么值),节点 1 和 6 间支路有功潮流上限为 5.6 MW,其余支路有功潮流上限为 3 MW。

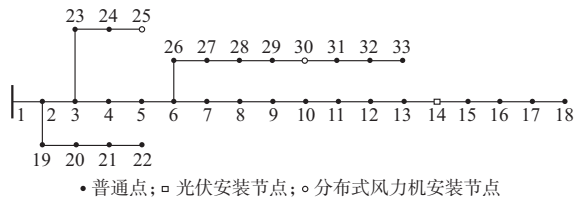


图 4 IEEE 33 节点系统接线
Fig.4 Single-line of IEEE 33 distribution system

PSTGA 参数:选择概率为 0.8;交叉概率为0.9;变异概率为 0.4;染色体总数为 100;子种群数为 4;最大迭代次数为 50;LHS 采样规模为 100 次;待采随机变量数为 69,包含 2 个风速变量、1 个太阳辐照强度变量、33 个节点有功负荷变量以及 33 个节点无功负荷变量。本文测试环境为 MATLAB[®] 2011b,使用的 CPU 为 AMD Athlon™ II X4-635,主频为 2.91 GHz,内存为 2.00 GB。

4.2 结果分析

4.2.1 重构结果

表 1 为未安装 DG 时 IEEE 33 节点系统重构结果。

表 1 IEEE 33 节点系统重构结果(无 DG)
Table 1 Results of network reconfiguration of IEEE 33 distribution system without DG

情形	网损/kW	节点电压		开断支路
		最大	最小	
重构前	203.2	1.000	0.905	[33,34,35,36,37]
重构后	125.6	1.000	0.945	[7,9,14,28,32]

表 1 中,重构前后节点电压有较明显改善,系统网损也随之显著降低,表明在未安装任何分布式电源的情况下,重构对于改善电压、降低网损有一定积极意义。

针对含 DG 情况,本文取置信度 β_U 和 β_L 为相同数值,分别给出了置信度为 0.90,0.95,0.99 时 IEEE 33 节点系统重构结果,如表 2 所示。

表 2 不同置信度下 IEEE 33 节点系统重构结果(含 DG)
Table 2 Results of network reconfiguration of IEEE 33 distribution system with DG

置信度	网损期望/kW	节点电压		开断支路
		最大	最小	
0.90	87.3	1.000	0.956	[7,9,14,28,36]
0.95	87.3	1.000	0.956	[7,9,14,28,36]
0.99	87.3	1.000	0.956	[7,9,14,28,36]

由表 2 可见,不同置信度下的重构方案相同,之所以会出现这种情况是因为在该重构方案下系统中各节点电压均不越限、各支路潮流也不存在越限,而且系统总网损期望值最小。

图 5 给出系统各节点在有 DG 时重构前后的电压分布情况。

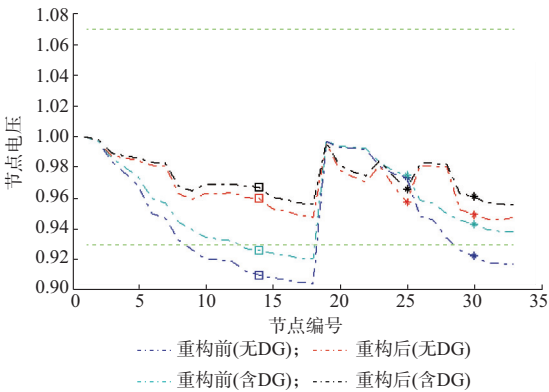


图 5 不同情形下节点电压分布情况
Fig.5 Voltage profile under different circumstances

由图 5 可以看出:①未安装 DG 时,系统中较多节点存在电压越下限的情况;安装 DG 后,系统节点电压越限情况稍有改善,但未完全消除(如节点 18);②未安装 DG 时,网络重构对于改善节点电压有一定作用,但在负荷波动的情况下可能存在部分节点电压越限的问题,在安装 DG 的基础上进行网络重构能够更大程度地改善节点电压分布,尤其是馈线末端节点处的电压。

针对 DG 接入情况下馈线末端节点可能存在电压越限的问题,本文选取部分有代表性的节点,分析了网络重构对上述节点处电压概率分布的影响,如图 6 所示。

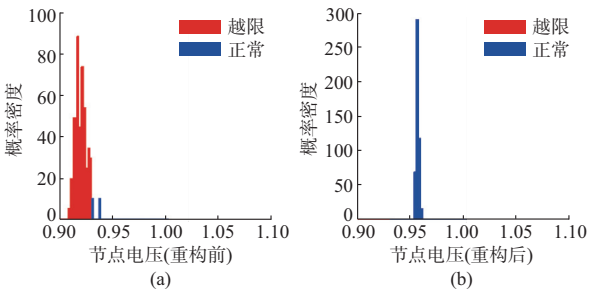


图 6 重构前后节点 18 处电压概率分布情况(含 DG)
Fig.6 PDF of voltage in node 18 before and after reconfiguration with DG

由图 6 可以看出:网络重构前节点 18 处存在较大的电压越限可能;网络重构后节点 18 处节点电压处于正常范围。这充分说明在 DG 接入情况下网络重构能有效改善馈线末端节点电压分布。

4.2.2 算法性能比较

本文从稳定性、收敛速度和计算耗时这 3 个角度,通过与 STGA,PSO,IHSA 和 ACS 的比较,验证所提出的 PSTGA 有效性。其中,STGA 参数:染色体总数为 100;最大迭代次数为 50;选择概率为 0.8;交叉概率为 0.9;变异概率为 0.4。PSO 参数:粒子总数为 100;最大迭代次数为 50;加速常数 $c_1=c_2=2$;惯性权重 $\omega \in [0.8, 1.2]$;飞翔速度 $v \in [-4, 4]$ 。IHSA 和 ACS 的参数参见文献[8-9]。

1)稳定性性能分析

为了测试 PSTGA 的稳定性,本文用 PSTGA 与其他算法求解不含 DG 情况下 IEEE 33 节点系统重构问题(情形 1),并在一定次数独立重复试验的基础上,对结果进行了统计处理,如表 3 所示。可见,PSTGA 具有较高的寻优率^[8],稳定性明显优于改进 PSO^[10]和 IHSA^[8],但稍逊于 STGA;PSTGA 得到的最优解与改进 PSO^[10],ACS^[9]给出的结果相同,且优于 IHSA^[8]的优化结果。

表 3 PSTGA 和 STGA 以及其他算法稳定性
Table 3 Stability of PSTGA, STGA and other algorithms

算法	试验次数	收敛到全局最优解次数	寻优率/%	最优解	网损最优值/kW
PSTGA	50	48	96	[7,9,14,28,32]	125.6
STGA	50	50	100	[7,9,14,28,32]	125.6
PSO	50	32	64	[7,9,14,28,32]	125.6
IHSA	100	33	33	[7,9,14,32,37]	133.0
ACS				[7,9,14,28,32]	125.6

注:最优值(网损)统一采用相同的潮流计算方法计算;ACS 无稳定性测试结果,故略去;寻优率为收敛到全局最优解次数与试验次数的比值。

2)收敛速度性能分析

同样,在情形 1 下,本文分别对 PSTGA,STGA 和 PSO 的收敛速度进行测试,并且独立重复试验次数为 50,结果如图 7 和表 4 所示。

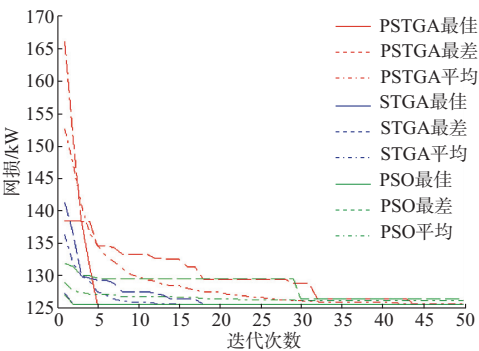


图 7 PSTGA,STGA 及 PSO 收敛性能
Fig.7 Convergence performance of PSTGA, STGA and PSO

表 4 PSTGA,STGA 和 PSO 收敛速度
Table 4 Convergence rate of PSTGA,STGA and PSO

算法	收敛到最优解时迭代次数		
	最小	最大	平均
PSTGA	5	44	22.90
STGA	2	18	8.31
PSO	2	30	9.49

注:此处最优解包括全局最优解和局部最优解。

改进 PSO^[10]和 STGA 收敛速度较快,而 PSTGA 收敛速度稍慢。结合稳定性测试结果,文献[10]所提出的改进 PSO 可能存在早熟现象,而 STGA 和 PSTGA 相对而言不易出现早熟现象。

3)并行效果性能分析

为了测试 PSTGA 的并行效果,本文针对情形 1 和情形 2(DG 接入下考虑机会约束的 IEEE 33 节点系统网络重构问题,置信度为 0.90)分别进行了多次独立重复试验,统计结果见表 5。

表 5 并行效果测试结果
Table 5 Test results of parallel efficiency

编号	情形	算法	计算方式	子种群数	样本总数	耗时/s
1	1	PSTGA	并行	4	50	20.80±0.62
2	1	STGA	串行	1	50	32.11±0.35
3	2	PSTGA	并行	4	20	457.31±8.76
4	2	STGA	串行	1	20	1 597.32±4.38

情形 1 中,PSTGA 比 STGA 耗时减少了约 36%,并未达到预期目标(耗时减少 75%),这主要是以下两方面因素综合的结果:①情形 1 计算规模较小;②并行计算本身存在一定的时间开销。情形 2 采用了 LHS-MCS,计算规模较大,因而 PSTGA 的并行优势体现得比较明显,耗时约为 STGA 的 28.6%。总之,PSTGA 因采用了并行方式,计算用时较 STGA 有不同程度的减少,具体减少程度视计算规模而定。

从上述性能分析结果可以看出,PSTGA 稳定性不错,并行效果明显,尤其适用于大规模计算的情况,但是收敛速度稍慢。

5 结语

本文基于机会约束规划,建立了以系统网损的数学期望最小为目标的配电网重构随机模型,并采用基于 LHS-MCS 的随机潮流来检验节点电压、支路潮流约束。设计了基于无向生成树的并行遗传算法以实现配电网重构模型的并行求解。研究结果如下。

1)在计及机会约束规划和 LHS-MCS 随机潮流的基础上建立的配电网重构随机模型,能比较充分

地描述以风电、光伏为代表不可控型分布式电源出力的不确定性。

2)在 DG 接入情况下进行配电网重构有助于降低系统网损,有效改善馈线末端节点电压分布,缓解节点电压越限。

3)PSTGA 具有不错的稳定性、较好地收敛速度和高效的并行能力,尤其适用于采用蒙特卡洛模拟法计算随机潮流的配电网重构问题的求解。

参考文献

- [1] 赵晶晶,李新,彭怡,等.基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J].电网技术,2009,33(17): 162-166.
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.
- [2] 王佳佳,吕林,刘俊勇,等.基于改进分层前推回代法的含分布发电单元的配电网重构[J].电网技术,2010,34(9):60-64.
WANG Jiajia, LÜ Lin, LIU Junyong, et al. Reconfiguration of distribution network containing distribution generation units based on improved layered forward-backward sweep method[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 60-64.
- [3] 丛鹏伟,唐巍,张璐,等.基于机会约束规划考虑 DG 与负荷多状态的配电网重构[J].电网技术,2013,39(9):2573-2579.
CONG Pengwei, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Chance-constrained programming based distribution network reconfiguration considering multi-states of distributed generation and load[J]. Power System Technology, 2013, 39(9): 2573-2579.
- [4] 李传健,刘前进.考虑风力发电随机性的配电网重构[J].电力系统自动化,2011,34(20):34-39.
LI Chuanjian, LIU Qianjin. Distribution network reconfiguration considering randomness of wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 34(20): 34-39.
- [5] 陈光,戴攀,周浩,等.计及入网电动汽车和分布式电源的配电系统重构[J].电网技术,2013,37(1):82-88.
CHEN Guang, DAI Pan, ZHOU Hao, et al. Distribution system reconfiguration considering distributed generators and plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 82-88.
- [6] 卞栋,卫志农,孙国强,等.需求响应视角下的配电网不确定性重构模型[J].电力系统自动化,2013,37(24):31-36.
BIAN Dong, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Distribution network uncertainty reconfiguration model in demand response perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 31-36.
- [7] 黄弦超,杨雨.基于电流分点编码的遗传算法在配电网重构中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(19):74-79.
HUANG Xianchao, YANG Yu. Network reconfiguration in distribution systems based on genetic algorithm with current point coding technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 74-79.
- [8] 陈春,汪泓,刘蓓,等.基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [9] WU Y K, LEE C Y, LIU L C, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1678-1685.
- [10] 卢志刚,杨国良,张晓辉,等.改进二进制粒子群优化算法在配电网重构中的应用[J].电力系统保护与控制,2009,37(7): 30-34.
LU Zhigang, YANG Guoliang, ZHANG Xiaohui, et al. Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 30-34.
- [11] 林济铿,潘光,李云鹏,等.基于基本树的网络拓扑放射性快速判断方法及配电网重构[J].中国电机工程学报,2013,33(25): 156-166.
LIN Jikeng, PAN Guang, LI Yunpeng, et al. A fast determination method of topological radial property of distribution network based on basic-tree and distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 156-166.
- [12] 向小蓉,刘添尘,向农,等.基于并行禁忌搜索算法的配电网重构[J].电网技术,2012,36(8):100-105.
XIANG Xiaorong, LIU Dichen, XIANG Nong, et al. Distribution network reconfiguration based on parallel tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 100-105.
- [13] OUYANG W, CHENG H, ZHANG X, et al. Distribution network planning considering distributed generation by genetic algorithm combined with graph theory[J]. Electric Power Components and Systems, 2010, 38(3): 325-339.
- [14] 欧阳武.含分布式发电的配电网规划研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- [15] 戴晓明,陈昌领,邵惠鹤,等.粗粒度并行遗传算法收敛性分析及优化运算[J].上海交通大学学报,2003,37(4):499-502.
DAI Xiaoming, CHEN Changling, SHAO Huihe, et al. Convergence analysis of coarse-grained parallel genetic algorithm and its application to optimization[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(4): 499-502.
- [16] 王成山,郑海峰,谢莹华,等.计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J].电力系统自动化,2006,29(24):39-44.
WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 29(24): 39-44.
- [17] 胡泽春,王锡凡.基于半不变量法的随机潮流误差分析[J].电网技术,2009,33(18):32-37.
HU Zechun, WANG Xifan. Error analysis of the probabilistic load flow based on cumulant method[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 32-37.
- [18] SU C L. Probabilistic load-flow computation using point estimate method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1843-1851.
- [19] 于晗,钟志勇,黄杰波,等.采用拉丁超立方采样的电力系统概

率潮流计算方法[J].电力系统自动化,2009,33(21):32-35.

YU Han, CHUNG Chiyong, WONG Kitpo, et al. A probabilistic load flow calculation method with latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35.

黄红程(1989—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统规划、电力系统优化运行和新能源。E-mail:

huanghongcheng1989@sjtu.edu.cn

顾洁(1971—),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行及规划、电力市场、智能电网和高温超导技术在电力系统中的应用。E-mail: gujie@sjtu.edu.cn

方陈(1983—),男,博士,主要研究方向:智能电网、分布式能源和微电网优化运行。E-mail: fangc02@gmail.com

(编辑 王梦岩 章黎)

Application of Undirected Spanning Tree-based Parallel Genetic Algorithm in Distributed Network Reconfiguration

HUANG Hongcheng¹, GU Jie¹, FANG Chen²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: With the increasing penetration of uncontrollable distributed generators such as distributed wind generator and photovoltaic generation, the uncertainty of distributed generator has become a key factor in distribution network reconfiguration. Hence, a stochastic network reconfiguration model was used to minimize the mathematical expectation of overall power loss, considering the constraints of power flow, voltage and topology. The stochastic power flow based on Latin Hypercube sampling-Monte Carlo simulation (LHS-MCS) was used to examine the chance constraints of nodal voltage and branch power flow. To improve computational efficiency, parallel undirected spanning tree-based genetic algorithm (PSTGA) was proposed to solve the network reconfiguration in parallel. The results of test in IEEE 33-bus distribution system have confirmed the rationality of model. The efficiency of PSTGA has been proved by comparing with undirected spanning tree-based genetic algorithm, particle swarm optimization, ant colony searching optimization and improved harmony search algorithm.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2013BAA01B04) and State Grid Corporation of China (No. 520940120036).

Key words: distribution network reconfiguration; spanning tree; genetic algorithm; parallel algorithm; stochastic model; probabilistic power flow; Latin hypercube sampling; chance-constrained programming