

分布式电源对配网可靠性的影响及优化配置

赵 渊¹, 何 媛¹, 宿晓岚², 谢开贵¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市电力公司市区供电分公司, 重庆 400013)

摘要: 基于配电网供电可靠性分析分布式电源(DG)的选址与定容。在配电网发生故障时由故障前的实际运行情况动态地生成优化孤岛方案,并结合 DG 出力模型计算各负荷点的可靠性,得到系统电量不足指标;在此基础上,为克服粒子群优化(PSO)算法所存在的早熟问题以及人工鱼群算法(AFSA)的收敛速度过慢缺陷,对粒子人工鱼群混合优化算法进行适应性改进,有效提高了配电网中 DG 选址与定容优化的计算效率。通过对 IEEE-RBTS Bus6 系统主馈线 F4 进行分析,验证了所提方法的有效性和正确性。

关键词: 分布式电源; 配电; 可靠性; 评估; 选址; 定容; 粒子人工鱼群; 优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.003

0 引言

近年来,分布式电源(DG)技术因独有的环保性和经济性在全球范围内引起了人们越来越多的关注。DG 具有减轻环境污染、降低终端用户费用、减少线路损耗、改善电能质量和提高配电网可靠性等特点^[1-2],种类繁多的 DG 以不同方式、容量和位置接入配电网,改变了传统配电网的结构和运行方式,同时也对配电网可靠性评估带来显著影响。

目前,国内外众多学者都对 DG 接入配电网所带来的影响进行了多方面分析。其中关于 DG 的选址与定容却大部分集中于以提升系统经济性或降低网损为目标,鲜有文献将 DG 的优化配置与配电网可靠性评估相结合。文献[3-7]以网损最小为优化目标,分别采用蜂群算法^[3]、启发式搜索法^[4]、遗传算法^[5]、改进粒子群算法^[7]等进行求解。文献[5]提出在降低网损的同时还需保证可接受的系统可靠性等级与电压质量,但其对配电网可靠性的考虑仅粗略体现于约束条件中。文献[6]将 DG 的选址与定容分开,先以等效网损微增率的排序结果确定 DG 安装位置,再通过考虑有功网损、电压和环境改善程度来确定最优容量。文献[8]以配电网年运行费用最小为

目标,综合考虑电网网损费用、DG 运行总费用以及购电费用,但没有评价 DG 的接入对配电网可靠性的影响。文献[9]虽基于电力不足概率对 DG 配置方案进行了可靠性评估,但其主要研究微电网内 DG 作为备用电源时的优化配置,且将 DG 出力看作恒功率输出模型。

孤岛是随 DG 引入配电网后应运而生的一种新运行方式,它的存在使配电网故障恢复和可靠性评估变得更加复杂。文献[10]根据负荷的重要程度建立孤岛划分模型,采用改进的最小路法研究了恒功率 DG 并网对配电网可靠性的影响。文献[11-12]结合孤岛成功运行概率,分别采用多场景技术和风力发电机多状态模型对含风电 DG 的配电网进行可靠性评估,但都没有明确孤岛的划分策略。文献[10-12]认为计划孤岛一旦确定,对于任何故障情况其孤岛运行策略不再改变,使得孤岛运行不能很好地与当前实际运行状态相配合。文献[13]从确定风电的最大供电范围与供电次序来代替孤岛搜索,实现风电随机出力与其供电范围内供电可靠性指标的映射。

综上所述,本文从改善配电网供电可靠性角度出发,根据 DG 出力模型和配电网实际运行情况,将动态孤岛搜索与可靠性评估相结合,从而得到各负荷点与系统可靠性指标。在此基础上,为克服粒子群优化(PSO)算法所存在的早熟问题以及人工鱼群算法(AFSA)收敛速度过慢的缺陷,提出适用于 DG 优化配置的改进粒子人工鱼群混合优化算法。通过对 IEEE-RBTS Bus6 系统主馈线 F4 进行分析,验证了所提方法的有效性和正确性。

1 最优孤岛搜索

1.1 风力发电机的可靠性模型

风电具有保护环境、节约资源等特点,是目前可

收稿日期:2013-09-26;修回日期:2014-07-18

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A107);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CDJZR11150012);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711208);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2011BB6047)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A107), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (CDJZR11150012), Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security (2007DA10512711208) and the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC, 2011BB6047)

再生 DG 的一种重要形式,其大量接入将对电网的可靠性评估产生重大影响。

风电的输出功率受风速影响而具有间歇性与随机性,因而不能简单地用两状态模型来描述其功率输出特性。图 1 描绘了风电机组的输出功率与风速之间的关系曲线。

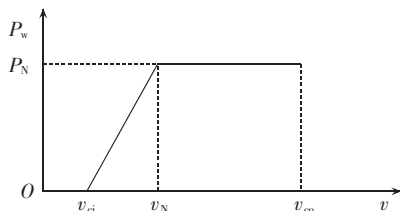


图 1 风电机组功率特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of wind turbine generator output power

由图 1 可得到风电输出功率与风速之间的函数关系如下^[11-13]:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ \frac{v - v_{ci}}{v_N - v_{ci}} P_N & v_{ci} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_w 、 P_N 分别为风力发电机的输出功率、额定功率; v_{ci} 、 v_N 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速、切出风速。

本文以小时平均风速代替实时风速,采用文献[14]中的小时风速及持续时间数据。风力发电机的切入风速为 4m/s,额定风速为 14m/s,切出风速为 25m/s。结合式(1)可将风力发电机划分为 S 个出力状态,其不同输出功率水平及所对应的概率值如表 1 所示。

表 1 风电机组输出功率的概率分布

Tab.1 Probability distribution of wind turbine generator output power

$v/(m \cdot s^{-1})$	持续小时数/h	P_w	概率
0~4 或 ≥ 25	2428	0	0.2772
5	941	$0.1P_N$	0.1074
6	946	$0.2P_N$	0.1080
7	896	$0.3P_N$	0.1023
8	805	$0.4P_N$	0.0919
9	690	$0.5P_N$	0.0788
10	565	$0.6P_N$	0.0645
11	444	$0.7P_N$	0.0507
12	335	$0.8P_N$	0.0382
13	243	$0.9P_N$	0.0277
14~24	467	P_N	0.0533

1.2 结合配电网运行实际确定孤岛划分

DG 接入配电网的方式主要分为通过变电站母线接入和通过馈线接入^[15]。通常情况下配电网母线被视为无限大电源,因此,从可靠性角度出发,本文讨论 DG 通过馈线接入的情况。

在配电网接入 DG 的位置与额定容量确定的情况下进行最优孤岛划分,需要考虑故障发生的位置

和 DG 的出力状态模型。本文对文献[15]所提出的启发式孤岛搜索方法加以改进,使之适用于以提高配电网可靠性为目的的 DG 优化配置。

首先确定孤岛划分的两大原则:在岛内负荷不超过 DG 总出力的前提下尽可能包含多的负荷;尽可能包含负荷等级高的负荷^[15-16]。下面给出最优孤岛搜索的算法步骤。

(1)本文假设配电网中每条馈线都可接入 DG,在每条馈线段上装设分段装置,馈线段数目为 n 。通过网络化简,以馈线两端的断路器和隔离开关为端点,将配电网分为 n 个馈线单元,每个单元都为 DG 配置的候选地址。各单元按其功率值 $P_a(a=1,2,\cdots,n)$,分为正单元、负单元以及零单元,其中正单元($P_a>0$)代表该单元对外输出功率,负单元($P_a<0$)代表该单元消耗功率,零单元($P_a=0$)代表该单元既不输出也不消耗功率。将负荷功率设为负值,DG 功率设为正值。图 2 为一简单的单元划分示例,其中单元 1、4、5、6 为负单元,单元 2 为零单元,单元 3 的功率值则由负荷和 DG 输出功率共同决定。

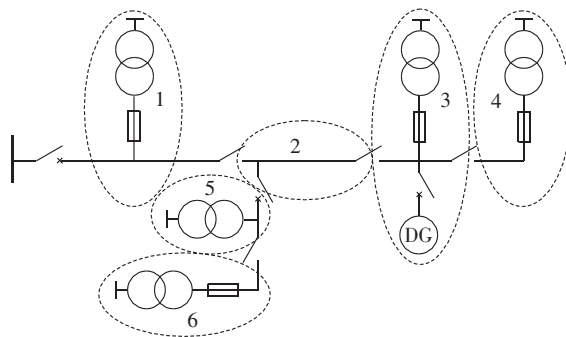


图 2 单元划分示例

Fig.2 Example of cell division

(2)形成单元联接矩阵 A 。对于原配电网(DG 没有接入),针对 n 个馈线单元形成 n 维单元联接矩阵 $A(n \times n \text{ 维})$, $A_{ij}=1(i,j=1,2,\cdots,n;i \neq j)$ 表示单元 i 与 j 相邻, $A_{ij}=0(i \neq j)$ 表示不相邻,令 $A_{ij}=0(i=j)$ 。记录各个单元的单元特征,即功率值大小 P_k 和负荷等级(分为一、二、三类负荷,一类负荷为最重要的负荷)。当单元 $f(f=1,2,\cdots,n)$ 发生故障并引起其邻近的隔离开关或断路器动作时,配电网结构发生改变,则令矩阵 A 中第 f 行和第 f 列元素都为 0,得到新的单元联接矩阵 A ,其每一行代表了此单元与其余单元的邻接关系。

(3)考虑 DG 的接入,修改各单元的功率值。DG 接入个数为 m ,额定功率为 $P_{DGt}(t=1,2,\cdots,m)$,接入的单元编号为 $n_{\text{cell}t}$ 。本文认为所研究的配电网区域在同一时刻风速相同,因此可按照表 1 得到状态 $s(s=1,2,\cdots,S)$ 出现的概率 p_s ,以及该状态下各风力发电机的输出功率水平 $P_{DGt,s}$ 。将第 $n_{\text{cell}t}(n_{\text{cell}t} \neq f)$ 个单元

的功率值改为在原基础上加上 $P_{DG,s}$, 得到在状态 s 下的新功率值向量 $\mathbf{P}_s = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ 。

(4) 搜索在状态 s 下的孤岛划分方案, 步骤如下。

a. 对于每个正单元, 其满足本地负荷需求, 都可各自形成最初的孤岛。设某一正单元的单元编号为 $k (k=1, 2, \dots, n)$, 对其执行孤岛扩大操作。在矩阵 $\mathbf{A}$ 第 k 行中找到其单元邻接表, 若相邻单元中含正/零单元 g , 立刻将其融入; 若只有负单元, 则查看其是否满足单元 k 的供电能力。如果所有相邻单元都在 k 的供电能力外, 则孤岛不再继续扩大; 否则, 将其中负荷等级最高的单元 g 融入, 合并成为一个新的单元。新单元包含了原单元 k 和 g 这 2 块区域, 其功率值更新为 $P_k + P_g (P_k + P_g \geq 0)$ 。单元联接矩阵 $\mathbf{A}$ 也相应改变: 融合前所有与 k 或 g 相邻的单元 (除去 k 和 g 本身) 成为融合后新单元相邻的单元, 而之前相邻于 k 或 g 的单元, 都修改为与新单元相邻。具体操作为: ① 将矩阵 $\mathbf{A}$ 第 g 行所有元素对应相加到第 k 行, 在新的第 k 行元素中, 若存在大于 1 的值, 将其置 1, 并将该行中第 k 和 g 个元素值置零, 同时令第 g 行所有元素为零; ② 若存在 $A_{i,g}=1 (i=1, 2, \dots, n)$ 的元素, 则修改为 $A_{i,g}=0, A_{i,k}=1$ 。以图 2 为例, 假设单元 1 发生故障, 矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 1 行和第 1 列都置零, 单元 2 和 3 融合, 则:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{①}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{②}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

新矩阵 $\mathbf{A}$ 仍然为 $n \times n$ 维矩阵, 原单元 2 和 3 合二为一成为新的单元 2, 其余单元编号不变。该方法可减少计算复杂度, 方便以下步骤继续执行。

b. 按照步骤 **a** 的方法对孤岛继续扩大, 直到不能扩大且遍历所有正单元为止。得到初步孤岛划分结果。

c. 继续查找是否有同时邻接至少 2 个初步孤岛的负单元, 如果有, 则找出满足邻接孤岛联合供电能力的单元, 并将其中负荷等级最高的单元融入。接着以类似步骤 **a** 的方法修改新孤岛单元的功率值和单元联接矩阵 $\mathbf{A}$, 若其仍具有继续扩大的能力, 则返回上述步骤继续执行直到各孤岛单元都不再融合为止, 由此得到状态 s 下的最终孤岛划分方案, 记为一次完整孤岛搜索。

对于同一单元故障分别按照 S 个风力发电机出力状态作 S 次完整孤岛搜索, 记录下该单元故障时的 S 种孤岛划分方案以及每一种对应方案发生的概率 p_s , 为配电网可靠性评估做好铺垫。

2 结合孤岛搜索对配电网作可靠性评估

按照 1.2 节的单元划分对含风力发电机的配电网进行可靠性评估, 风力发电机通过断路器接口接入配电网。通常情况下仅考虑单阶元件故障, 且在故障修复期内不会出现新的元件故障。

为得到各负荷点可靠性指标的解析计算模型, 首先进行网络化简, 求取各馈线单元的等效故障率。馈线单元由变压器、负荷支路、熔断器、馈线段、断路器以及全部或部分 DG 组成。将馈线单元的等效故障率分为对外影响和对内影响, 对外影响的等效故障率为:

$$\lambda_i^{\text{out}} = \lambda_{Li} + (1 - p_f)(\lambda_{Ti} + \lambda_{Li}) + (1 - p_b)\lambda_{DGi} \quad (2)$$

对内影响即表示该单元内元件发生故障时对该负荷支路线上的负荷点的可靠性影响, 即:

$$\lambda_i^{\text{in}} = \lambda_{Li} + (\lambda_{Ti} + \lambda_{Li}) + (1 - p_b)\lambda_{DGi} \quad (3)$$

其中, λ_i^{out} 和 λ_i^{in} 分别为第 i 个馈线单元对外和对内影响的等效故障率; λ_{Li} 、 λ_{Ti} 、 λ_{Li} 、 λ_{DGi} 分别为该单元内馈线段、变压器、负荷支路线以及 DG 的故障率; p_f 和 p_b 分别为熔断器和断路器可靠工作的概率。若单元内缺少某些元件, 将其对应参数设置为 0 即可。

配电网加入 DG 后与传统配电网的最大区别在于故障恢复时间的不同, 即故障所引起的负荷点停运时间发生改变。本文将可靠性计算的最小路法与故障后最优孤岛搜索相结合。首先求取每个负荷点到母线电源的最小路, 将所有单元分为最小路上的单元与非最小路上的单元。

将负荷点 j 作为研究对象, 其最小路上的单元故障都会引起负荷点 j 停运, 停运时间依赖于系统的结构、故障单元的位置以及 DG 的配置与出力状态。设故障单元 q 为其最小路上的单元, 启动第 1 节的孤岛搜索程序, 得到 S 个状态下的 S 种孤岛划分方案及对应概率 p_s , 统计负荷点 j 位于孤岛内的概率 p_{island} , 由此得到该负荷点在单元 q 故障时的停运时间 r_{jq} 为:

$$r_{jq} = p_{\text{island}} t_1 + (1 - p_{\text{island}}) t_2 \quad (4)$$

其中, $t_1 = \max\{V, T\}$, 代表负荷点 j 位于孤岛内, V 为分段装置的操作时间, T 为孤岛形成需要的倒闸操作时间; t_2 为故障单元的平均修复时间, 代表负荷点 j 不在孤岛内。

当负荷点 j 非最小路上的单元发生故障, 可根据系统结构, 将其对负荷点可靠性指标的影响折算到相应的最小路单元上进行处理, 不再赘述。

应用上述方法结合网络法中串联等值原理即可求得各负荷点的等值故障率 λ_j 、故障修复时间 r_j 以及年停电时间 U_j 。则系统的电量不足指标为:

$$\text{ENSI} = \sum L_j U_j \quad (5)$$

$$U_j = \lambda_j r_j$$

其中, L_j 为第 j 个负荷点的平均负荷。该指标即可作为 DG 定容与选址的目标函数。

另外, 为提高配电网重要负荷的供电可靠性, 本文提出带负荷权重的系统可靠性指标为:

$$\text{ENSL}_w = \sum w_j L_j U_j \quad (6)$$

其中, w_j 代表了负荷的重要程度, 其值越大, 该负荷越重要。

3 基于配电网可靠性的 DG 优化配置

3.1 DG 优化配置的数学模型

本文以提升配电网供电可靠性为目标, 对 DG 的选址与定容进行优化。

首先需要建立 DG 优化配置的数学模型, 根据目标函数可取为式(5)或式(6)。由于 DG 的加入会对配电网的运行、同步和稳定等方面产生一定的影响, 因此 DG 的定容需考虑到系统所能接受的最大穿透功率限制^[5,17], 即根据实际需要和电网发展情况限制 DG 所允许接入的总容量。

$$0 \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{DG}i} \leq R \quad (7)$$

其中, n 为可安装 DG 的候选节点个数; $P_{\text{DG}i}$ 为节点 i 实际接入的 DG 容量; R 为系统中 DG 所允许接入的总容量, 其可由最大穿透功率限制进行确定。

待选节点 DG 安装容量约束为:

$$0 \leq P_{\text{DG}i} \leq R_i \quad (8)$$

接入 DG 个数约束为:

$$0 \leq m \leq M \quad (9)$$

其中, R_i 为节点 i 允许安装的 DG 最大容量; m 、 M 分别为 DG 实际接入个数和允许安装的最大个数。 R_i 和 M 的大小可根据实际需要和电网发展情况进行确定。其中参数 n 、 R_i 、 R 、 M 为事先已知量, $P_{\text{DG}i}$ 、 m 值即为该优化模型的 DG 优化配置结果。

此外, 还可加入系统潮流约束、节点电压约束、线路容量约束等。

将上述模型的不等式约束以惩罚因子的形式并入到归一化目标函数中, 作为优化计算的适应度函数。

3.2 粒子人工鱼群混合优化算法的 DG 优化配置

粒子群和人工鱼群算法的原理介绍可参照文献[18-19], 本文不再赘述。利用粒子群算法的快速局部搜索和人工鱼群的全局收敛性, 通过相互跟踪最优解, 实现种群间的信息共享, 可有效应用于求解以提升配电网可靠性为目标的 DG 优化配置。

对于状态变量的编码, 最简单的方法是以可安装 DG 的候选节点数 n 为变量维数, 即 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的值表示节点 i 所接入的 DG 容量, $x_i=0$ 则代表节点不安装 DG。然而, 当 n 值较大时, 这样的变量设置会导致计算量过大且不易获得最

优解。通常情况下, 配电网中接入 DG 的最大个数 M 远小于可安装 DG 的候选节点数 n , $\mathbf{X}$ 中大部分变量值为 0。因此, 为了减少状态变量维数, 提高计算效率, 本文将粒子群优化算法中每个粒子的个体状态和人工鱼群算法中每条人工鱼的个体状态均定义为向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_M, x_{1+M}, x_{2+M}, \dots, x_{2M})$, 其中 x_i ($i=1, 2, \dots, 2M$) 为欲寻优的变量, $\mathbf{X}$ 中前 M 个变量代表 DG 的安装地址, 后 M 个变量即为对应的安装容量(安装地址 x_i 对应容量 x_{i+M} ($i=1, 2, \dots, M$))。

需要注意的是, 状态变量 $\mathbf{X}$ 中前 M 个变量为整数变量, 其取值范围为 $[1, n]$; 而后 M 个变量则为实数变量, 取值范围为 $[0, R_i]$ ($i=1, 2, \dots, M$)。为减少计算复杂度, 本文将 $\mathbf{X}$ 中所有变量转换为相同取值范围内的实数。具体操作为:

$2M$ 个变量 $y_1, y_2, \dots, y_M, y_{1+M}, y_{2+M}, \dots, y_{2M}$ 均属于 $[0, 1]$ 区间内的实数, x_i 与 y_i ($i=1, 2, \dots, 2M$) 对应。则有:

$$x_i = \begin{cases} \min([ny_i] + 1, n) & i \leq M \\ R_i y_i & i > M \end{cases} \quad (10)$$

其中, $[ny_i]$ 表示不大于 ny_i 的最大整数。若存在 $x_i=0$, 即意味着实际接入配电网中的 DG 个数 m 小于允许安装的最大个数 M 。

将粒子群与人工鱼群有效结合, 虽然可在一定程度上增强全局收敛性, 提高计算速度, 但在非全局极值点出现较严重的聚集情况时, 其收敛速度将大幅减缓, 甚至再次陷入局部最优。因此, 本文通过适时添加变异操作, 引导种群寻优计算的同时保持个体多样性, 使之适用于配网中的 DG 选址与定容优化。其计算步骤如下。

a. 初始化。 确定种群规模 N , 在变量可行域内随机生成 N 个个体, 设置算法基本参数惯性权值 $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 、学习因子 c_1 和 c_2 、位置限值 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 、速度限制 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 、视野范围 F_{visual} 、移动步长 δ_{step} 、拥挤度因子 δ 、试探次数 n_t 、最大迭代次数 n_{itermax} , 以及 R_i 、 R 、 M 、惩罚因子和变异概率 p 等。优化变量按上述策略进行编码。计算每个个体的适应度函数值, 取最优值及相应的 DG 配置策略赋值给公告板, 初始 $\mathbf{g}_{\text{best}}$ (整个粒子群的历史最优位置) 也取为该公告板上的配置方案。

b. 粒子人工鱼群算法。 把种群均分为 2 个种群 pop_1 、 pop_2 。在每次迭代中, 将 pop_1 按粒子群算法操作, 得到 $\mathbf{p}_{\text{best}}$ (个体粒子的历史最优位置)、 $\mathbf{g}_{\text{best}}$ 及新的种群 pop_1^* ; pop_2 按人工鱼群算法操作, 得到最优解 $\mathbf{u}$ 及新的种群 pop_2^* 。为加强 2 个种群间的信息交流, 提高计算效率, 将 $\mathbf{g}_{\text{best}}$ 、 $\mathbf{u}$ 以及原公告板上的数值进行比较, 取最优解赋值于新的公告板, 同时, 也更新 $\mathbf{g}_{\text{best}}$ 为该公告板上的解, 为下一次迭代做好准备。

c. 根据具体情况选择变异。 若公告板在连续 2

次迭代过程中没有改变或变化极小,为防止陷入局部最优,采用增加随机扰动的方法对其进行变异操作,即 $\mathbf{g}_{best}=\mathbf{g}_{best}+0.5\text{rands}(1,2M)$,其中 $\text{rands}(1,2M)$ 为 $(-1,1)$ 内的随机数向量。计算适应度函数值并与原公告板进行比较,若优则变异成功,更新公告板和 $\mathbf{g}_{best}$;否则,重新变异,直到变异成功或达到预置的最大尝试次数为止。

d. 变异操作。为提高计算效率,在每一次迭代结束时,从 pop_1^* 与 pop_2^* 中选出适应度最差的 $N/10$ 个个体,每个个体产生一个随机数 $\text{rand} \in (0,1)$ 。若 $\text{rand} < p$,该个体变异, $\mathbf{X}_i=\mathbf{X}_i+0.5\text{rands}(1,2M)$,其中 $\mathbf{X}_i$ 为被选中的个体。注意,在以上步骤中,当个体内某一变量或多个变量值越限,则将该变量置为相应的边界值,使变量限制于 $[x_{\min},x_{\max}]$ 内。

e. 判断迭代次数 n_{iter} 是否达到预置的最大迭代次数 n_{itermax} ,若是则转向步骤 f,否则继续进行下一次优化迭代。

f. 算法终止,输出最优解(即公告板中的 DG 配置方案)。

算法流程如图 3 所示。

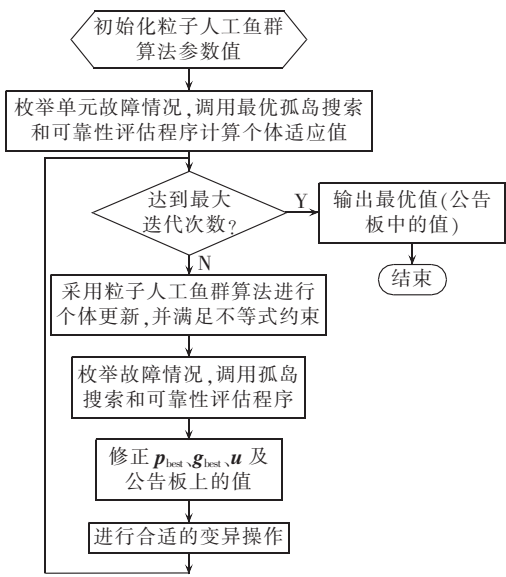


图 3 求解 DG 优化配置的流程图
Fig.3 Flowchart of optimal DG allocation

4 算例分析

本文采用 IEEE-RBTS Bus6 系统主馈线 F4 作为测试系统进行 DG 的布点规划,见图 4。该系统包括 25 条馈线段,5 条负荷支路线,21 个隔离开关,4 个断路器,23 个负荷点及配电变压器、熔断器。设断路器和熔断器 100%可靠动作, $\max\{V,T\}$ 取为 0.5 h。各元件及负荷点的原始数据见表 2—4,一、二、三类负荷的单位权重分别取 100、10、1。

粒子人工鱼群混合优化算法的参数选取如下:

$c_1=c_2=2,\omega_{\max}=0.9,\omega_{\min}=0.4$,由于所有变量都转化为 $[0,1]$ 区间内的实数,则取 $x_{\max}=1,x_{\min}=0,v_{\max}=-v_{\min}=1$;可视域 $F_{\text{visual}}=2$,移动步长 $\delta_{\text{step}}=0.3$,拥挤度因子 $\delta=0.618,n_t$ 为 30 次;惩罚因子取 1 000,变异概率 $p=0.1$,种群规模 N 取 60,最大迭代次数为 100。

由 1.2 节单元划分方法可将图 4 的配电网测试系统划分为 25 个馈线单元,其单元编号 1—25 如图 4 所示,每个单元都可接入 DG,即 $n=25$ 。以下从配电网无 DG 接入、接入 DG 类型为风力发电机、接入恒功率输出 DG 几个方面来讨论 DG 的优化配置对配电网可靠性的影响。

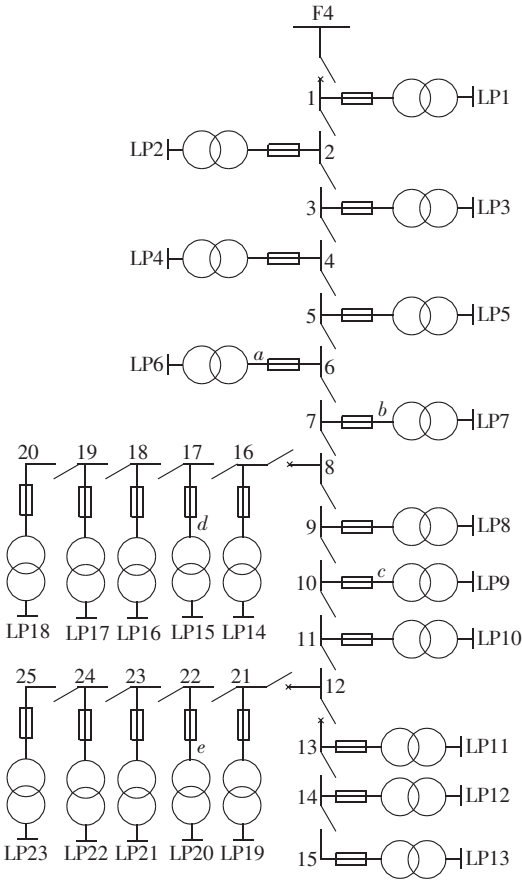


图 4 配电网测试系统
Fig.4 Distribution network test system

表 2 元件可靠性参数

Tab.2 Reliability parameters of components		
元件	λ	r
变压器	0.015 次/a	200 h/次
线路	0.065 次/(a·km)	5 h/次

表 3 线路参数

Tab.3 Parameters of lines			
线路号	长度/km	线路号	长度/km
a,c	0.60	2,6,15,19,22	2.5
b,e	0.75	1,10,13,18,21,25	2.8
d	0.80	9,14,16,20,24	3.2
4,8	0.90	11	3.5
3,5,7,12,17,23	1.60		

表 4 负荷点参数
Tab.4 Parameters of load point

负荷编号 (类型)	平均 负荷/MW	负荷编号 (类型)	平均 负荷/MW
LP1(2)	0.1659	LP13(3)	0.2501
LP2(3)	0.1808	LP14(3)	0.1554
LP3(3)	0.2501	LP15(2)	0.1929
LP4(3)	0.2633	LP16(2)	0.1585
LP5(1)	0.2070	LP17(3)	0.2501
LP6(2)	0.1659	LP18(3)	0.2633
LP7(1)	0.3057	LP19(3)	0.1554
LP8(3)	0.1554	LP20(2)	0.1929
LP9(1)	0.2831	LP21(1)	0.2831
LP10(2)	0.1585	LP22(2)	0.1585
LP11(3)	0.1554	LP23(1)	0.3057
LP12(2)	0.1585		

注:括号内的数字 1、2、3 分别代表一、二、三类负荷。

Case1:配电网无 DG 接入,计算得到系统可靠性指标 $ENSI=50.079\ 5\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$, $ENSI_w=1\ 690.602\ 4\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$ 。由于篇幅限制,本文仅列出一类负荷点的可靠性指标如表 5 所示。

表 5 无 DG 时的负荷点可靠性指标
Tab.5 Reliability indexes of load points without DG

一类负荷点编号	$\lambda_j/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_j/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_j/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
LP5	1.6725	3.9332	6.5783
LP7	1.7213	4.6601	8.0213
LP9	1.7115	5.8374	9.9907
LP21	2.5110	5.4659	13.7250
LP23	2.5110	6.1649	15.4800

由表 5 可知,在无 DG 接入时,越靠近配电网末端的负荷点其可靠性越差。

Case2:DG 类型为风力发电机,待选单个风力发电机的额定容量为 $C\times 100\ \text{kW}(C=1,2,\cdots,10)$,各节点允许安装的最大容量 $R_i=1\ \text{MW}$,系统允许接入的风力发电机总容量 $R=2\ \text{MW}$,可安装数目 $M=3$ 。

目标函数采用式(6),利用本文模型与方法得到的风力发电机优化配置结果如表 6 所示。表 7 给出了该配置方案下一类负荷点可靠性指标。

表 6 风电机组最优配置方案
Tab.6 Optimal allocation scheme of
wind turbine generators

安装位置	安装容量/MW
24	1
25	1

表 7 配置风电机组后的负荷点可靠性指标
Tab.7 Reliability indexes of load points
with wind turbine generators

一类负荷点编号	$\lambda_j/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_j/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_j/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
LP5	1.6725	3.9332	6.5782
LP7	1.7213	4.5523	7.8357
LP9	1.7115	5.4789	9.3771
LP21	2.5110	4.0125	10.0755
LP23	2.5110	4.0988	10.2922

目标函数值 $ENSI_w=1\ 388.953\ 4\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$,系统的电量不足指标 $ENSI=45.185\ 6\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$ 。与 Case1 相比,配置风力发电机后各负荷点以及系统的可靠性水平都得到了提升,尤其对配电网中末端的重要负荷,其可靠性改善效果更加明显。由表 6 可知,风力发电机的安装位置靠近配电网末端,且位于重要负荷附近。

Case3:接入恒功率输出的 DG,其余条件与 Case2 相同。该 DG 采用两状态模型,可用率取为 0.98,以式(6)为目标函数,得到 DG 优化配置结果如表 8 所示。表 9 给出了该方案下一类负荷点可靠性指标。

表 8 DG 最优配置方案
Tab.8 Optimal allocation scheme of DGs

安装位置	安装容量/MW
8	0.7
10	0.3
25	1.0

表 9 配置 DG 后的负荷点可靠性指标
Tab.9 Reliability indexes of load points with DGs

一类负荷点编号	$\lambda_j/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_j/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_j/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
LP5	1.6725	2.5963	4.3424
LP7	1.7213	2.6784	4.6101
LP9	1.7115	2.8897	4.9457
LP21	2.5110	1.9499	4.8962
LP23	2.5110	2.1009	5.2753

目标函数值 $ENSI_w=797.448\ 1\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$,系统的电量不足指标 $ENSI=37.347\ 1\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$ 。优化结果表明,恒功率输出 DG 安装于配电网中末端,仍聚集在重要负荷附近。且相比于配置总容量相同的风力发电机,该方案的可靠性改善效果更好。由此可见,若 DG 能够保持稳定的功率输出,尽量克服风力发电机输出功率的随机性与间歇性,配电网便能获得更高的可靠性水平。

Case4:接入恒功率输出的 DG,以式(5)为目标函数进行 DG 的选址与定容,其计算结果如表 10、11 所示。

系统可靠性指标 $ENSI_w=1\ 079.394\ 1\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$, $ENSI=34.059\ 2\ \text{MW}\cdot\text{h/a}$ 。目标函数不同,配置方案与可靠性指标也不尽相同。该方案虽可以获得更好的系统电量不足指标,但其对重要负荷(如 LP5、LP7、LP9)的可靠性改善效果不明显。因此,该算例也从侧

表 10 基于 ENSI 的 DG 最优配置方案
Tab.10 Optimal DG allocation scheme
based on ENSI

安装位置	安装容量/MW
14	0.7
20	0.3
25	1.0

表 11 负荷点可靠性指标
Tab.11 Reliability indexes of load points

一类负荷点编号	$\lambda_j/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$r_j/(\text{h}\cdot\text{次}^{-1})$	$U_j/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
LP5	1.6725	3.9332	6.5783
LP7	1.7213	4.6601	8.0213
LP9	1.7115	5.8374	9.9907
LP21	2.5110	1.9499	4.8962
LP23	2.5110	2.1009	5.2753

面说明了不同的负荷重要程度和负荷分布会导致不同的 DG 优化配置方案和配电网可靠性水平。

图 5 为以 $ENSL_w$ 为目标函数,分别采用改进的粒子人工鱼群算法、自适应粒子群算法以及人工鱼群算法对 Case3 作 DG 优化配置的迭代曲线图。从图 5 可以看出,粒子群优化算法由于缺乏适当的引导容易陷入局部最优,出现早熟现象;人工鱼群算法相比粒子群优化算法能更好地搜索最优解,但运行效率较低,且搜索精度不高;本文所提方法集合了粒子群优化算法与人工鱼群算法两者的优点,并引入变异操作,具有较快的收敛速度和良好的精度。

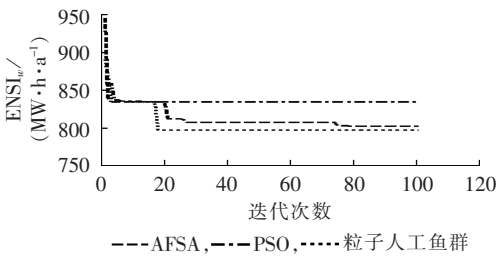


图 5 为 DG 优化配置采用不同优化算法的迭代曲线对比图

Fig.5 Comparison of iteration curve among different DG allocation optimization algorithms

5 结论

本文从改善配电网供电可靠性的角度出发,根据配电网运行实际和风力发电机出力模型动态地生成故障后孤岛方案,并与配电网可靠性评估相结合。采用改进粒子人工鱼群混合优化算法,以带负荷权重的系统可靠性指标 $ENSL_w$ 为目标函数分析 DG 的选址与定容。仿真结果得到以下结论。

- a. DG 的安装位置位于配电网中末端,且与配电网的负荷分布、负荷重要程度以及 DG 类型密切相关。
- b. 改进粒子人工鱼群混合算法增强了个体间的信息交流,粒子群优化算法与人工鱼群算法相互取长补短,通过适当的变异操作,有效地提高了寻优效率。
- c. 通过对有无 DG 接入的配电网可靠性计算结果进行比较可知,DG 的接入提高了系统可靠性,尤其对重要负荷的可靠性改善效果明显。因此,合理地接入 DG 对提高配电网的供电可靠性具有重大意义。

另外,Case2 和 Case3 的仿真结果比较表明,在系统所允许接入 DG 总容量和其他约束条件相同的情况下,相比于优化配置具有间歇性和随机性的风力发电机,配置恒功率输出 DG 能够给配电网带来更好的可靠性性能。因此,在配置新能源 DG 时可以适当配合储能设备或其他策略,稳定功率输出,进一步提升配电网可靠性的同时还能降低系统成本,提高环保性能。

参考文献:

[1] 王守相,王慧,蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):110-114.
WANG Shouxiang,WANG Hui,CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33 (18): 110-114.

[2] BAE In-su,KIM Jin-o. Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007,22(2):785-790.

[3] ABU-MOUTI F S,EI-HAWARY M E. Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2011, 26(4):2090-2101.

[4] WANG Caisheng,NEHRIR M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(4):2068-2076.

[5] BORGES C L T,FALCAO D M. Optimal distributed generation allocation for reliability,losses,and voltage improvement [J]. Electrical Power and Energy Systems,2006,28(6):413-420.

[6] 郑漳华,艾芊,顾承红,等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):23-28.
ZHENG Zhanghua,AI Qian,GU Chenghong,et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(13):23-28.

[7] 刘波,张焰,杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报,2008,23(2):103-108.
LIU Bo,ZHANG Yan,YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(2):103-108.

[8] 叶德意,何正友,臧天磊. 基于自适应变异粒子群算法的分布式电源选址与容量确定[J]. 电网技术,2011,35(6):155-160.
YE Deyi,HE Zhengyou,ZANG Tianlei. Siting and sizing of distributed generation planning based on adaptive mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2011,35(6):155-160.

[9] 赵国波,刘天琪,李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置 [J]. 电力系统自动化,2009,33(1):85-88.
ZHAO Guobo,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Optimal deployment of distributed generation as backup generators [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(1):85-88.

[10] 刘传铨,张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化,2007,31(22):46-49.

- LIU Chuanquan,ZHANG Yan. Distribution network reliability considering distribution generation [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(22):46-49.
- [11] 陈臻,吴文传,张伯明,等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):67-72.
- CHEN Can,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(34):67-72.
- [12] 徐玉琴,吴颖超. 考虑风力发电影响的配电网可靠性评估[J]. 电网技术,2011,35(4):154-158.
- XU Yuqin,WU Yingchao. Reliability evaluation for distribution system connected with wind-turbine generators[J]. Power System Technology,2011,35(4):154-158.
- [13] 何禹清,彭建春,孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):16-22.
- HE Yuqing,PENG Jianchun,SUN Qian. Fast algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):16-22.
- [14] MASTERS G M. 高效可再生分布式发电系统[M]. 王宾,董新洲,译. 北京:机械工业出版社,2010:133-135.
- [15] 易新,陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术,2006,30(7):50-54.
- YI Xin,LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology,2006,30(7):50-54.
- [16] MAO Yiming,MIU K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(4):1346-1352.
- [17] SUDIPTA G,GHOSH S P,SARADINDU G. Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system [J]. Electrical Power and Energy Systems,2010,32(8):849-856.
- [18] 罗德相,周永权,黄华娟. 粒子群和人工鱼群混合优化算法[J]. 计算机与应用化学,2009,26(10):1257-1261.
- LUO Dexiang,ZHOU Yongquan,HUANG Huajuan. Hybrid optimization algorithm based on particle swarm and artificial fish swarm algorithm [J]. Computers and Applied Chemistry,2009,26(10):1257-1261.
- [19] 姚祥光,周永权,李咏梅. 人工鱼群与微粒群混合优化算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(6):2084-2086.
- YAO Xiangguang,ZHOU Yongquan,LI Yongmei. Hybrid algorithm with artificial fish swarm algorithm and PSO [J]. Application Research of Computers,2010,27(6):2084-2086.

作者简介:



赵 渊

赵 渊(1974-),男,四川三台人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:yuanzhao@msn.cn);

何 媛(1989-),女,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:heyuancq@foxmail.com);

宿晓岚(1969-),女,四川彭山人,高级工程师,从事电力系统规划与可靠性方面的研究工作(E-mail:591191976@qq.com)。

Effect of distributed generation on power distribution system reliability and its optimal allocation

ZHAO Yuan¹, HE Yuan¹, SU Xiaolan², XIE Kaigui¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Urban Power Supply Branch Company of Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400013, China)

Abstract: The siting and sizing of DG (Distributed Generation) are analyzed based on the power supply reliability of distributed system. During system fault, the optimal islanding scheme is generated according to the actual pre-fault operating conditions, and the reliability of each load point is calculated together with the DG output model to obtain the energy insufficiency index of system, based on which and aiming at the premature convergence of PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm and the slow convergence speed of AFSA (Artificial Fish Swarm Algorithm), the particle and artificial fish hybrid optimization algorithm is improved in the adaptability to effectively enhance the calculation efficiency of DG siting and sizing optimization for power distribution system. The main feeder F4 of IEEE-RBTS Bus6 system is analyzed, which verifies the effectiveness and correctness of the proposed method.

Key words: distributed generation; electric power distribution; reliability; assessment; siting; sizing; particle and artificial fish; optimization