

考虑配电网结构变化的 DG 规划

高艺文, 刘俊勇, 雷成, 龚辉

(智能电网四川省重点实验室(四川大学电气信息学院), 四川 成都 610065)

摘要: 为了更合理地将分布式电源并入配电网中, 提出考虑配网结构变化影响的DG规划。首先采用损耗灵敏度因子对DG进行最优布置, 然后建立了以最大减少系统网损为目标的网络重构与DG容量配置的综合优化模型, 并通过改进的细菌觅食算法对所提模型进行求解, 最后用IEEE33和IEEE69节点系统进行仿真计算。计算结果表明, 考虑配电网结构变化的DG规划更加实际、有效。

关键词: 分布式电源规划; 配网结构变化; 细菌觅食算法; 损耗灵敏度因子; 综合优化

DG planning considering the variation of the distribution network structure

GAO Yi-wen, LIU Jun-yong, LEI Cheng, GONG Hui

(Sichuan Key Laboratory of Intellectual Grid, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to connect DG to distribution network more reasonably, a new method of DG planning considering the variation of the distribution network structure is put forward. Firstly, this paper uses the loss sensitivity factor to get the optimal layout of DG. To minimize the system loss, the comprehensive optimization model is built to configure the network reconstruction and DG capacity. Secondly, the improved bacterial foraging algorithm is used to solve the proposed model. Finally, the IEEE33 and IEEE69's node system are used for simulation calculation. The calculation results indicate that the DG planning considering the variation of the distribution network structure is more practical and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977059).

Key words: distributed generation planning; variation of the distribution network structure; bacterial foraging algorithm; loss sensitivity factors; comprehensive optimization

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0040-07

0 引言

配电网结构在运行时并不是一成不变的, 会因配电网重构发生变化。配电网重构是配电网优化的一种手段, 主要通过改变分段开关和联络开关的开闭组合来改变网络拓扑结构, 从而达到降低网损、平衡系统负荷、提高供电可靠性和电压水平的目的^[1-2]。随着分布式电源(Distributed generation, DG)在配电网中应用的快速发展, DG大量的接入配电网开始对配电系统的线路潮流、节点电压、网络损耗等诸多方面带来影响, 因此合理的DG规划, 才能充

分发挥 DG 功能, 改善配电网的运行状态^[3-5]。目前规划 DG 接入配电网时, 是假定配电网的运行结构不变的 DG 最优规划。而实际运行中已规划好 DG 的配电网的网络结构会随着配电网重构发生变化, 这会导致已规划好的 DG 在配电网中的位置发生变化。这时的 DG 位置和容量并不适用变化后的网络结构。因此为了更加合理地规划 DG, 减少结构变化对其的影响, 有必要在 DG 规划的同时考虑配电网重构。

近年来, 国内外学者就DG规划做了大量理论和实践的研究。文献[6-7]从全网出发, 以降损为目标对DG进行优化配置; 文献[8]以最大化有功输出为目标函数, 将DG的出力、线路的热稳定极限等作为约束, 形成数学模型, 然后利用线性规划方法求解该模型; 文献[9]综合考虑网损、电压质量和电流质

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977059); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011SCU11063); 四川省科技厅产业发展重大关键技术项目(2011GZ0225)

量三个指标, 建立了分布式电源选址定容的多目标决策模型; 文献[10]采用机会约束规划方法, 建立间歇性DG与补偿电容的综合最优配置模型。上述优化规划方法虽然对配网DG规划具有一定的指导作用, 但未考虑配电网运行时网络结构变化对DG规划的实际影响。此外当采用多目标规划模型对DG进行独立优化配置时, 其最优方案并不能很好地兼顾系统运行特性和DG的最优接入。

本文充分考虑配网结构变化对 DG 规划的影响, 先对 DG 位置进行最优布置, 然后建立包含网络重构的 DG 容量规划模型, 再通过改进细菌觅食算法对模型进行求解, 并详细说明了编码方案, 适应度函数的构造, 改进算法参数的设置和计算步骤, 最后用两个 IEEE 典型测试系统对本文所提的方法进行有效性的验证。

1 DG 的最优布置

为了有效布置 DG, 本文利用灵敏度分析计算配网系统中节点的损耗灵敏度因子确定 DG 的安装位置。图 1 是节点 $K-1$ 和 K 组成的一条阻抗为 $R_k + jX_k$ 线路, 节点 K 的负荷为 $P_{LK} + jQ_{LK}$, 节点 K 的电压幅值为 V_K 。

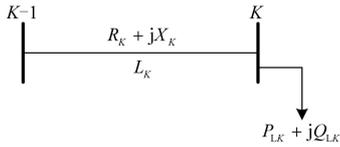


图 1 L_K 线路的拓扑结构

Fig. 1 Circuit topology of line L_K

线路 L_K 的有功损耗为

$$P_{\text{LOSS}_{L_K}} = \frac{(P_{L_K}^2 + Q_{L_K}^2)R_K}{V_K^2} \quad (1)$$

那么损耗 L_K 的灵敏度因子为

$$\frac{\partial P_{\text{LOSS}_{L_K}}}{\partial P_{L_K}} = \frac{2P_{L_K}R_K}{V_K^2} \quad (2)$$

损耗灵敏度因子 (LSF) 反映了节点有功变化对线路有功损耗的影响。在系统中选择节点安装 DG 时, 可以通过损耗灵敏度因子对节点进行排序, 选出绝对值较大的节点进行安装。应该注意的是, 系统中有些节点不能够或者不适宜安装 DG, 应将其从系统中剔除, 再对其他节点重新排序、选择。

2 配电网重构和 DG 容量的综合优化模型

配电网进行一次重构后, 其有功网损的变化量表示为

$$\Delta P_{\text{LOSS}}^R = \sum_{K=1}^N k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - \sum_{K=1}^N k_{iR} r_i \frac{P_{iR}^2 + Q_{iR}^2}{V_{iR}^2} \quad (3)$$

式中: N 表示配电网中的支路总数; k_i 表示重构前开关 i 的状态, 0 表示断开, 1 表示闭合; r_i 是支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 是重构前流过支路 i 的有功功率和无功功率; V_i 是重构前支路 i 末端节点的电压; k_{iR} 表示重构后开关 i 的状态, 0 表示断开, 1 表示闭合; P_{iR} 、 Q_{iR} 是重构后流过支路 i 的有功功率和无功功率; V_{iR} 是重构后支路 i 末端节点的电压。

不考虑 DG 时拓扑结构如图 2, 配电网网络损耗为

$$P_{\text{LOSS}}^{\text{NDG}} = \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V^2} r_k \quad (4)$$

式中: r_k 为线路的总电阻; P_{L_k} 、 Q_{L_k} 是负荷端的有功功率和无功功率; V 是负荷端电压。

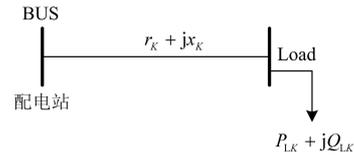


图 2 未接入 DG 的网络拓扑结构

Fig. 2 Network topology structure without DG

当 DG 接入配网后, 其拓扑结构如图 3。

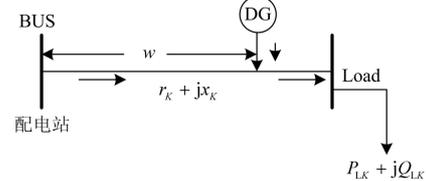


图 3 含 DG 的网络拓扑结构

Fig. 3 Network topology structure containing DG

如图 3 考虑 DG 注入功率时, 配电网网络损耗可划分为两个部分^[6]: 1) 配电站 BUS 到 DG 之间的线路损耗; 2) DG 到末节点负荷之间的线路损耗。

$$\begin{cases} P_{\text{Loss1}}^{\text{DG}} = \left[\frac{(P_{L_k} - P_G)^2 + (Q_{L_k} - Q_G)^2}{V_k^2} \right] r_k w\% \\ P_{\text{Loss2}}^{\text{DG}} = \left[\frac{P_{L_k}^2 + Q_{L_k}^2}{V_k^2} \right] r_k (1 - w\%) \end{cases} \quad (5)$$

因此接入 DG 后的网络损耗为

$$P_{\text{LOSS}}^{\text{DG}} = P_{\text{Loss1}}^{\text{DG}} + P_{\text{Loss2}}^{\text{DG}} = \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V^2} r_k + \frac{(P_G^2 + Q_G^2 - 2P_{L_k}P_G - Q_{L_k}Q_G)W\%}{V^2} r_k \quad (6)$$

式中: P_G 、 Q_G 是 DG 的有功功率和无功功率; r_k 为线

路的总电阻, P_{Lk} 、 Q_{Lk} 是负荷端的有功功率和无功功率; V 是负荷端电压; $w\%$ 是DG接入配电网后距离配电所端的距离占线路总长度的比重。

本文DG直接连接在末节点负荷上, 则 $w\%=1$, 可推导出注入DG功率后其网络损耗的变化量为

$$\Delta P_{\text{LOSS}}^{\text{DG}} = P_{\text{LOSS}}^{\text{NDG}} - P_{\text{LOSS}}^{\text{DG}} = \frac{2P_L P_G + 2Q_L Q_G - P_G^2 - Q_G^2}{V^2} r_k \quad (7)$$

综上, 配网重构和DG容量优化模型的目标函数可由最大化减少系统网络损耗表示, 公式为

$$\max P = \max(\Delta P_{\text{LOSS}}^{\text{R}} + \Delta P_{\text{LOSS}}^{\text{DG}}) \quad (8)$$

配电网满足以下约束条件: 辐射状网络和无孤岛网络、线路电流值约束、电压降约束、潮流约束和DG容量约束, 即

$$\begin{cases} I_i \leq I_{i\max} \\ V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max} \\ P_i \leq P_i^{\max} \\ AP = D \\ \sum_{j=1}^M P_{\text{DG}j} \leq P_{\text{DG}\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_i 是支路 i 流过的电流, $I_{i\max}$ 是最大允许流过支路 i 的电流; V_j 是节点 j 的电压, $V_{j\min}$ 是节点 j 的电压下限, $V_{j\max}$ 是节点 j 的电压上限; P_i 、 P_i^{\max} 分别为电源 i 的负载量和最大供电能力; A 为支路与节点的关联矩阵; P 为馈线潮流矢量, D 为负荷需求矢量; $P_{\text{DG}j}$ 为第 j 台DG容量; $P_{\text{DG}\max}$ 为DG最大允许安装容量; M 为DG台数。

配网重构和DG容量的综合优化是一个大规模非线性整数组合优化问题。本文采用收敛速度快, 全局寻优能力强的细菌觅食算法进行求解。为了提高算法的计算速度和精度适应本文需要求解的优化问题, 对原算法进行了一定的改进。

3 改进的细菌觅食算法

细菌觅食优化算法(Bacteria Foraging Optimization Algorithm, BFOA)是Passino于2002年提出模拟人类大肠杆菌觅食行为的仿生进化算法。算法主要通过趋化操作、繁殖操作和迁移操作这三种操作迭代计算来求解最优问题的^[11]。

根据细菌觅食的生物行为, 细菌个体随着年龄的增长会慢慢的老化, 其活跃性会越来越低, 运动速度也越来越慢, 而新生的细菌活跃性强, 运动速度快, 因此不同年龄的细菌的步长特性是不同的^[12-13]。新生的细菌适应度值好, 老化的细菌适应

度值较差, 如果新生细菌趋化步长越长, 收敛到最优解的速度越快。因此对细菌的趋化运动过程做一些修正, 每个细菌在趋化操作过程按以下步骤进行。

1) 给细菌个体进行灵敏度赋值, 表征细菌个体的活跃性, 公式表示为

$$V = \frac{J_i}{J_{\max}} \times \text{rand}(X_{\min}, X_{\max}) \quad (10)$$

式中: V 为灵敏度; X_{\max} 为灵敏度变量边界上限; X_{\min} 为变量边界下限; J 为适应度值。

2) 翻转加入一个随机向量 $\Delta(i)$ 进行方向的调整, 并按下式更新细菌位置和适应度值。

$$P(i, j+1, k, l) = P(i, j, k, l) + C(i)\Phi(i) \quad (11)$$

$$\Phi(i) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (12)$$

式中: $C(i)$ 为按选定方向游动的单位步长; $\Delta(i)$ 为变向时生成的随机向量; $\Phi(i)$ 为方向调整后选定的方向。

3) 如翻转使细菌适应值得到改善, 细菌则按照翻转的方向进行游动, 直至适应值不再改善。游动步长用 CV 来表示, C 为单位步长, V 为灵敏度。

4) 细菌个体的灵敏度随着生命周期的增加, 会不断变化且呈线性递减趋势, 进行一次趋化操作后还应更新细菌个体的灵敏度。

$$V_{Nc+1} = \frac{\text{step}_{\max} - \text{step}_i}{\text{step}_{\max}} V_{Nc} \quad (13)$$

式中: V_{Nc} 和 V_{Nc+1} 是翻转游动前后的灵敏度; step 是细菌个体的生命步长总数。

在迁移操作过程里, 每个细菌设定了相同的迁移概率 P_{ed} , 会丢失精英个体, 导致迁移成为解的退化。为此, 根据细菌的年龄情况, 赋予细菌自适应迁移概率, 对较差的细菌进行随机或指定迁移。所有细菌按照式(14)进行自适应概率迁移。

$$S_{\text{el}}(B_{ac_i}) = \frac{J_{\max}(B_{ac}) - J_i(B_{ac})}{J_{\max}(B_{ac}) - J_{\min}(B_{ac})} P_{\text{ed}} \quad (14)$$

式中: J 为生命函数; P_{ed} 为基本迁移概率。

原算法早熟或不熟的问题, 使算法陷入局部最优。为此, 将高斯分布估计算法的思想引入繁殖算子对存活下来的年轻较好的 S_r 个细菌进行分布估计再生以增加群体的多样性, 提高收敛速度和算法的全局寻优能力。这里先对每个细菌按照年龄(适应度的累加和)进行排序, 活跃性较差的半数细菌死亡, 对年轻较好的半数细菌进行分布估计再生。假设待优化变量的每一个维度相互独立, 且各维度之间服从高斯分布, 繁殖复制方法为

$$Y_{v,\sigma} = g_{\text{norm}} \sigma + \mu \quad (15)$$

$$g_{\text{norm}} = \sqrt{-2 \ln g_1} \sin(2\pi g_2) \quad (16)$$

式中: g_1 和 g_2 为区间[0,1]均匀分布的随机数; g_{norm} 产生的公式称为BOX-MULLER公式; μ 和 σ 分别为细菌较优位置的分维度均值和标准差向量; 乘积采用点乘。

4 配网重构和 DG 容量综合优化的计算

4.1 编码

配网重构和DG容量的综合优化, 包括开关组合优化和DG容量配置的优化两个部分, 因此细菌个体可表示为开关组合和DG容量组合的集合。

$$B = \{c_1, c_2, \dots, c_n, s_1, s_2, \dots, s_m\} \quad (17)$$

式中: c_n 是重构后打开的开关号; n 为打开开关数; s_m 为DG配置的第 m 台DG容量; m 为DG的台数。

如: 细菌个体{7,8,11,12,13,29,1.45,0.32,0.89}, 则打开开关组合是包含6个开关的集合: {7,8,11,12,13,29}, DG容量配置是包含3个DG容量的集合: {1.45,0.32,0.89}。

4.2 适应函数

细菌觅食算法会对每个细菌进行适应度排序以完成优胜劣汰, 所以适应度函数要取正值。本文的配网重构和DG容量的综合优化的目标函数是一个求解非负最大值的问题, 因此直接可以把目标函数当作适应函数。

4.3 计算步骤

分布式电源规划和配网重构综合优化的计算流程如图4所示。

5 算例分析

在Matlab平台上以IEEE33和IEEE69节点测试系统进行仿真测试。

IEEE33节点系统的额定电压为12.66 kV, 总负荷3715 kW+j2300 kvar, 同时包含33个节点, 37条支路, 5个联络开关, 具体结构见文献[14], 参数设置见表1。

IEEE69节点系统的额定电压为12.66 kV, 总负荷为3802 kW+j2694.6 kvar, 同时包含69个节点, 73条支路, 5个联络开关, 具体结构见文献[14], 参数设置见表1。

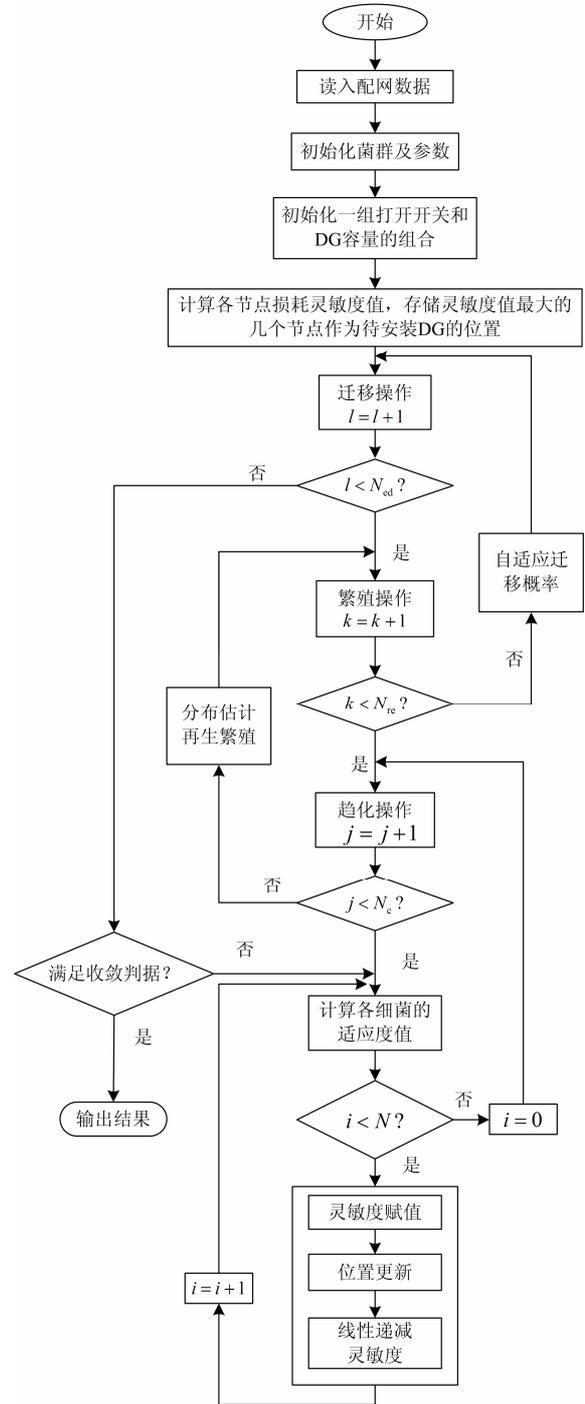


图4 DG规划和配网重构综合优化的计算流程

Fig. 4 Calculation process of comprehensive optimization for DG planning and distribution network reconfiguration

表1 设定的算法参数

Table 1 Values assigned to the algorithm parameters

测试系统	S	N_c	C	N_{re}	N_{ed}	P_{ed}
IEEE33	20	40	4	4	2	0.25
IEEE69	50	40	4	4	2	0.25

表1中： S 是细菌种群数； N_c 是趋化次数； C 是趋化步长； N_{re} 是繁殖次数； N_{ed} 是迁移次数；其中收敛判据为达到最大迭代次数或前后两次迭代所有节点最大电压幅值修正量小于 10^{-16} kV。

为了证明本文所提方法的优越性，在以下四种场景中分别对IEEE33和IEEE69节点系统进行优化计算。为了简化计算，本文假定有3个待安装DG的位置，DG安装容量不超过2 MW，不同负荷水平的对比结果如表2和表3所示。

场景1：未进行配网重构和DG规划

场景2：只进行配网重构

场景3：只进行DG的规划

场景4：考虑配网重构的DG规划（本文）

表2 对IEEE33系统不同场景和负荷水平的优化结果

Table 2 Different scenarios and loads' optimization results of IEEE33 system

场景	负荷水平	网损/kW	打开开关组合	DG的容量 (MW/位置)
1	最小	0	33,34,35,36,37	-
	一般	0	33,34,35,36,37	-
	最大	0	33,34,35,36,37	-
2	最小	13.79	7,9,14,32,37	-
	一般	64.61	7,9,14,32,37	-
	最大	195.12	7,9,14,32,37	-
3	最小	23.75	33,34,35,36,37	0.178/17,0.129/18,0.53/33
	一般	105.91	33,34,35,36,37	0.578/17,0.108/18,1.05/33
	最大	313.96	33,34,35,36,37	0.911/17,0.201/18,1.63/33
4	最小	29.3	10,14,16,56,62	0.423/31,0.195/32,0.275/33
	一般	129.62	7,10,14,28,32	0.56/31,0.523/32,0.586/33
	最大	380.89	10,13,18,58,61	1.255/31,0.573/32,0.93/33

表3 对IEEE69系统不同场景和负荷水平的优化结果

Table 3 Different scenarios and loads' optimization results of IEEE69 system

场景	负荷水平	网损/kW	打开开关组合	DG的容量 (MW/位置)
1	最小	0	69,70,71,72,73	-
	一般	0	69,70,71,72,73	-
	最大	0	69,70,71,72,73	-
2	最小	27.85	14,57,61,69,70	-
	一般	125.65	13,18,56,61,69	-
	最大	380.95	13,18,55,61,69	-
3	最小	29.83	69,70,71,72,73	0.58/63,0.13/64,0.26/65
	一般	138.23	69,70,71,72,73	1.32/63,0.373/64,0.102/65
	最大	422.03	69,70,71,72,73	0.159/63,0.83/64,1.98/65
4	最小	40.54	10,14,16,56,62	0.352/60,0.31/61,0.346/62
	一般	184.7	13,17,58,61,69	0.353/60,1.07/61,0.46/62
	最大	547.86	10,13,18,58,61	0.822/60,1.61/61,0.972/62

由表2和表3可以看出，对IEEE33和IEEE69两个节点测试系统进行配网重构和DG规划综合优化的网损量比只进行配网重构的优化和只进行DG的规划的网损量减少的得多。并且配电系统节点数越多，负荷水平越大，系统网损减少量越多。对这四种场景，在一般负荷水平下进行优化后，IEEE33节点系统各节点电压的对比，如图5所示。

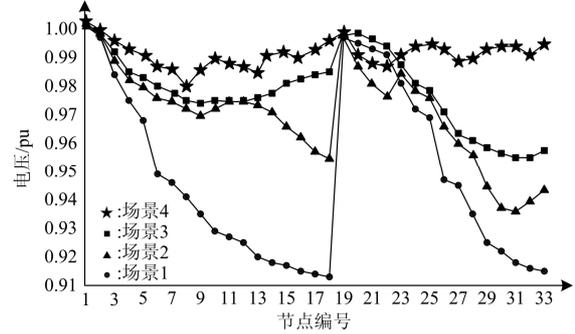


图5 IEEE33节点系统的电压分布

Fig. 5 Voltage profiles of IEEE 33-bus system

从图5可知，场景2，3，4的优化策略对配电系统电压水平都有提升，说明DG的接入和配网重构都能改善系统的运行水平，提高系统电压的安全稳定，而场景4的优化策略对电压水平的改善效果最好。

将本文改进细菌觅食算法同文献[15-17]所提算法对场景4一般负荷水平下的优化问题进行连续50次迭代计算，记录每次迭代次数，统计出最小迭代次数、最大迭代次数和平均迭代次数。IEEE69仿真系统的统计结果如表4所示。

表4 对IEEE69节点测试系统不同算法寻优性能对比

Table 4 Optimizing performance in different algorithms for IEEE69-bus

算法	最小迭代次数	最大迭代次数	平均迭代次数
文献[15]	9	35	21.5
文献[16]	11	26	18
文献[17]	6	16	11
本文	5	14	9

从表4可知，本文的算法相较于其他算法寻优性能更好。在连续50次计算中，本文算法和文献[17]的迭代次数相近，但平均迭代次数比文献[17]减少了2次。并且采用本文算法，仅需要9次迭代就可收敛。说明本文的改进算法在解决配网重构和DG配置同时优化的问题时具有较快的收敛速度和良好的全局寻优能力。

6 结论

1) 本文在配电网运行特点的基础上, 提出了考虑配电网结构变化的DG规划, 从而大大减少系统网损, 改善系统的电压水平, 使得DG规划更加合理、实际。

2) 给细菌觅食算法中的细菌个体赋予灵敏度值和自适应迁移概率, 改进了细菌位置更新的规则, 进一步提高了算法的搜索速度效率; 同时, 将高斯分布思想引入到繁殖算子中, 克服了算法容易早熟的不足。

3) 对多种负荷方式(最大负荷方式、一般负荷方式和最小负荷方式)进行了计算, 其 DG 规划的计算结果更加符合实际情况。

参考文献

- [1] 杨建军, 战红. 基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 122-125.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong. Application of the improved genetic algorithm based on graph theory in distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 122-125.
- [2] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiu-fan, CUI Huan-jun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [3] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [4] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
XU Yu-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [5] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, TU You-qing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [6] 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. 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.
- [7] Celli G, Pilo F. Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks[C] // 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on PICA, Sydney, Australia, 2001.
- [8] Keane A, O'Malley M. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1640-1646.
- [9] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 115-121.
- [10] 邓威, 李欣然, 刘志勇, 等. 考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 80-88.
DENG Wei, LI Xin-ran, LIU Zhi-yong, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation considering reactive power compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 80-88.
- [11] Prakash K, Sydulu M. Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1-5.
- [12] Liu Y, Passino K M. Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: models, principles,

- and emergent behaviors[J]. J Optimization Theory Applicat, 2002, 115(3): 603-628.
- [13] Sebag M, Ducoulombier A. Extending population-based in cremental learning to continuous search spaces[C] // Proc of the 5rd Conf on Parallel Problem Sovling from Nature-PPSN V. Amsterdam: Springer-Verlag, 1988: 418-427.
- [14] 吕林, 罗绮, 刘俊勇, 等. 基于多种群分层粒子群优化的配电网重构[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 42-45.
Lü Lin, LUO Qi, LIU Jun-yong, et al. Reconfiguration of distribution network based on hierarchical structure poly-particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 42-45.
- [15] 李德华, 王韶, 刘洋, 等. 模糊遗传算法和蚁群算法相结合的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 26-31.
LI De-hua, WANG Shao, LIU Yang, et al. Distribution network reconfiguration based on the combination of fuzzy genetic algorithm and ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 26-31.
- [16] 王秀云, 熊谦敏, 杨劲松. 基于改进粒子群动态搜索算法的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 43-47.
WANG Xiu-yun, XIONG Qian-min, YANG Jin-song. Study of distribution network reconfiguration based on improved particle swarm optimization dynamic search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 43-47.
- [17] 王超学, 吕志奇, 董慧, 等. 基于改进蜜蜂进化型遗传算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 52-56.
WANG Chao-xue, Lü Zhi-qi, DONG Hui, et al. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on an improved bee evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 52-56.

收稿日期: 2013-05-27; 修回日期: 2013-09-29

作者简介:

高艺文(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为含分布式电源的电力系统优化运行; E-mail: scugyw89@163.com

刘俊勇(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与运行、电力市场、灵活交流输电等方面。