

基于博弈论的多目标配电网重构

丁阳, 汪泓, 宾峰, 周武

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:提出了一种基于博弈论的多目标配电网重构模型,该模型充分考虑了风电和光伏发电的出力不确定性,以降低配电网有功损耗、均衡负荷过载和减少开关操作次数为综合优化目标。将3个目标函数视为不同的博弈者,并考虑各目标之间存在的相互制约关系,加入“后评价”选择机制,构建了合作博弈联盟模型探讨目标间可能存在的联系,并采用改进萤火虫算法对模型进行求解,利用适应度值的大小确定最终重构方案。IEEE 33节点配电网的测试结果表明,所用算法能够快速找到多目标重构博弈模型的均衡解,验证了在加入分布式电源的情况下,网络重构能明显改善配电网的各项指标。

关键词:配电网重构;多目标优化;博弈模型;混沌理论;萤火虫算法

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.005

0 引言

风电、光伏出力具有很强的随机性,其在配电网系统中的渗透率日益增加,对配电网重构的影响已不容忽视^[1]。风电、光伏等分布式电源 DG (Distributed Generation) 加入配电网对降低网络损耗、平衡负荷过载、提高节点电压水平及消纳可再生能源具有重要意义。

配电网重构一般可分为基于某个时间点的静态重构和基于某个时间段的动态重构^[2]。以往关于配电网重构的研究主要是以单一指标或双目标寻优作为静态重构的优化目标,而配电网重构实际上是一个复杂的非线性多目标动态问题^[3]。

文献[4]采用自适应粒子群优化算法求解多目标模型,并利用点估计来处理风电和光伏的出力不确定性,较好地解决了含 DG 不确定性的多目标配电网重构问题。文献[5]构建了基于非支配解排序粒子群优化算法的多目标配电网重构模型,但并没有考虑 DG 出力的不确定性。文献[6]以网络损耗和开关动作次数为优化目标构建了双目标动态重构模型,探究了配电网重构降损和减少开关动作量的最佳均衡关系,但未考虑负荷均衡度和电压质量。文献[7]选取平均供电可用率和系统供电量不足2个配电网指标来构建双目标函数,未考虑配电网中 DG 的高渗透率。

以上文献所考虑的配电网多目标重构都是以单一指标或双目标寻优作为重构优化目标,将多目标转化成单目标优化,未考虑各目标间的相互制约关系。博弈论是一种研究多个决策主体之间存在利益或竞争关系的最优决策理论,目前已在可再生

能源选址定容^[8]、电力调度^[9]、电力系统规划^[10]等方面得到了广泛应用^[11]。

基于上述分析,本文以降低配电网有功损耗、均衡负荷过载和减少开关操作次数为综合优化目标对配电网多目标重构进行研究,重点考察网络损耗和负荷均衡度组成的非合作博弈联盟模型。同时,对传统萤火虫算法进行改进,提出改进萤火虫算法 IFA (Improved Firefly Algorithm) 对博弈重构模型进行求解。最后,对 IEEE 33 节点配电网系统进行仿真分析,验证了本文所提模型的可行性和有效性,并分析了风电和光伏并网对多目标网络重构的影响。

1 风电机组和光伏机组的出力模型

随着以风能、光伏为代表的不可控型 DG 在配电网中的渗透率不断提高, DG 的不确定性成为了配电网重构中不得不考虑的重要因素^[12]。

1.1 风电机组数学模型

由于风速与风向的不确定性,风电机组的出力也随机变化。图1为风电机组输出功率 P_w 与风速 V 的关系曲线,近似拟合公式如下^[2]:

$$P_w = \begin{cases} 0 & V < V_{in}, V \geq V_{out} \\ \frac{P_r}{V_r^3 - V_{in}^3} V^3 - \frac{V_{in}^3}{V_r^3 - V_{in}^3} P_r & V_{in} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_r < V < V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_{in} 、 V_r 、 V_{out} 分别为风电机组的切入风速、额定风速和切出风速; P_r 为风电机组的额定输出功率。

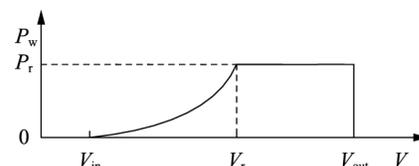


图1 风电机组出力曲线

Fig.1 Wind power output curve

收稿日期:2018-06-13;修回日期:2018-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677061,51507058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677061,51507058)

当 $V_{in} \leq V \leq V_{out}$ 时,风电机组启动;当 $V_r < V < V_{out}$ 时,风电机组出力为额定值;当 $V < V_{in}$ 或 $V \geq V_{out}$ 时,风电机组停止工作,从系统中解列。

根据已知的风速随机分布参数,可求得任意风速区间的概率,公式如下:

$$R\{S^{(k)}\} = R\{V_i \leq V \leq V_j\} = \int_{V_i}^{V_j} P_w(V) dV \quad (2)$$

其中, $S^{(k)}$ 为第 k 个风速场景; V_i 、 V_j 分别为风速场景的下限、上限。

风电机组进行并网发电时大多采用异步发电机,需从电网中吸收无功功率来建立旋转磁场以维持发电。风电机组可简化为 PQ 节点,假定风电机组中电容器的自动投切可保持功率因数恒定不变。无功功率可通过式(3)计算。

$$Q = P / \tan \psi \quad (3)$$

其中, ψ 为功率因数角,在风电机组中, ψ 一般位于第四象限,即 $\tan \psi$ 为负值。

1.2 光伏发电系统模型

由于光照强度具有随机性,光伏发电系统的输出功率也是随机的。太阳光照强度可近似看成 Beta 分布^[1],如式(4)所示。

$$f(l) = \frac{\Gamma(\tau + \xi)}{\Gamma(\tau)\Gamma(\xi)} \left(\frac{l}{l_{\max}}\right)^{\tau-1} \left(1 - \frac{l}{l_{\max}}\right)^{\xi-1} \quad (4)$$

其中, $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$; l 和 l_{\max} 分别为一段时间内的实际光照强度和最大光照强度,单位为 W/m^2 ; τ 、 ξ 为 Beta 分布的形状参数。

太阳能电池方阵总的输出功率为:

$$P_s = lA\eta \quad (5)$$

其中, A 为方阵总面积; η 为光电转换效率。

与风电机组发电相似,光伏发电机组通过投切电容器来保持功率因数不变,因此在潮流计算中光伏发电机组也可看作 PQ 节点。

光伏发电系统采用与风电机组类似的场景概率计算方法,在已知光照强度概率密度函数的基础上计算不同场景的概率。

1.3 场景分析法

配电网重构过程中,不确定性因素主要来源于风电机组的出力和光伏电池板的输出功率,因此重构模型所选取的场景是以上 2 种场景的组合。场景分析法能够高效地解决随机性问题,建立更符合实际的多目标重构优化模型。该方法将不确定性因素转化为确定性场景,使模型得到简化、计算效率得到提高^[1]。对于场景选取的标准,最常用的一种评价方法是:比较基于场景发生概率目标函数的期望值,定义如式(6)所示。

$$\min \{E[f(G_i)]\} \Leftrightarrow \min \left\{ \sum_{j=1}^{n_s} P^{(j)} f_j^i \right\} \Leftrightarrow G_{\text{best}} \quad (6)$$

其中, n_s 为确定的场景数; $P^{(j)}$ 为场景 j 发生的概率; f_j^i 为场景 j 中第 i 个优化策略的综合评价价值; G_i 为第 i 个优化策略; $E[f(G_i)]$ 为第 i 个优化策略的目标函数期望值。

本文采用同步回代消除 SBR (Simultaneous Backward Reduction) 法削减大规模的场景,避免出现组合爆炸^[1]。该方法是通过迭代进行的,每一步迭代削减一个场景,并改变其他场景的概率,直到缩减至指定场景数。

定义场景 i 和 j 之间的距离为 2 种场景之间的 2 范数,如式(7)所示。

$$d(i, j) = \left[\sum_{h=1}^{m_s} (f_i^h - f_j^h)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

其中, m_s 为优化策略的综合评价价值的总个数。

同步回代消除法的具体步骤如下。

a. 明确需要削减的场景。缩减满足如下条件的场景 k' ($k' \in \{1, 2, \dots, n_s\}$):

$$P^{(k')} P^{(k)} \min_{k \neq k'} d(k, k') = \min_{a_s \in \{1, 2, \dots, n_s\}} P^{(a_s)} \left\{ \min_{a_s \neq b_s, b_s \in \{1, 2, \dots, n_s\}} P^{(b_s)} d(a_s, b_s) \right\}$$

b. 更新场景的总数, $n_s = n_s - 1$, 并记录与被缩减的场景 k' 最近的场景 k^* , 有:

$$d(k', k^*) = \min_{k' \neq k^*} P^{(k')} P^{(k^*)} d(k', k^*) \quad (8)$$

c. 更新场景 k^* 的概率 $P^{(k^*)} = P^{(k^*)} + P^{(k')}$, 以保证更新后的场景总的概率和仍为 1。

d. 若剩余场景数 n_s 仍多余指定场景数,则返回步骤 a 继续进行迭代。

2 配电网重构博弈模型

本文提出了一种配电网重构的多目标博弈模型,旨在解决只以单一指标或双目标寻优作为静态重构优化目标和未考虑各目标间存在的相互制约关系等系列问题。

2.1 博弈要素分析

将网络重构中的网络损耗、负荷均衡度、开关动作量视为不同的博弈者,既考虑各目标函数收益函数最大,又考虑重构策略切换时配电网的平稳过渡。

2.1.1 博弈参与者

将网络损耗、负荷均衡度、开关动作量视为 3 个不同的博弈者,记博弈者集为 $\{P_i | i=1, 2, 3\}$, 其中 P_i 为配电网重构中第 i 个最优目标函数。

2.1.2 博弈策略

博弈者 P_i 的策略是网络内 P_i 达到最优时的开关状态,对应的策略集 S_i 为:

$$S_i = \{S_{1i}, S_{2i}, \dots, S_{ki}, \dots\} \quad (9)$$

其中, S_{ki} 为博弈者 P_i 的第 k 种网络重构策略, 包括网络中 M 个联络开关、 N 个分段开关的状态, 为 $M+N$ 维变量, 如式 (10) 所示。

$$S_{ki} = \{C_{1,i}^k, \dots, C_{j,i}^k, \dots, C_{M,i}^k, D_{1,i}^k, \dots, D_{z,i}^k, \dots, D_{N,i}^k\} \quad (10)$$

其中, $C_{j,i}^k (j=1, 2, \dots, M)$ 和 $D_{z,i}^k (z=1, 2, \dots, N)$ 分别为博弈者 P_i 的第 k 种网络重构策略下联络开关 j 和分段开关 z 的状态, 取值为 1 时表示闭合开关, 取值为 0 时表示断开开关。

配电网重构的 Nash 均衡策略集为:

$$S_i^* = \{S_{1i}^*, S_{2i}^*, \dots, S_{ki}^*, \dots\} \quad (11)$$

其中, S_{ki}^* 为博弈者 P_i 的 Nash 均衡策略。

2.1.3 收益函数

博弈者 P_i 在开关不同投切状态中进行权衡, 一方面希望在网络损耗最小的条件下实现负荷不过载, 保证网络的正常运行, 另一方面期望减少开关动作次数, 以维持网络在重构下的平稳过渡。因此, 本文首先将博弈者 P_i 在策略 S_{ki} 下的收益函数 $F_i(S_{ki})$ 表示为网络损耗、负荷均衡度、开关动作损失的特殊加权形式, 如式 (12) 所示。

$$\min F_i(S_{ki}) = \alpha \bar{f}_1(S_{ki}) + \beta \bar{f}_2(S_{ki}) + \gamma \bar{f}_3(S_{ki}) \quad (12)$$

其中, α 、 β 和 γ 为 3 个收益函数的权重因子; $\bar{f}_1(S_{ki})$ 、 $\bar{f}_2(S_{ki})$ 、 $\bar{f}_3(S_{ki})$ 分别为网络重构策略 S_{ki} 下网络损耗、负荷均衡度、开关动作损失经标么化处理后的结果, 标么化公式如式 (13) 所示。

$$\bar{f}_j(S_{ki}) = \frac{f_j(S_{ki})}{f_j(S_{ki}^*)} \quad j=1, 2, 3 \quad (13)$$

其中, $f_1(S_{ki})$ 、 $f_2(S_{ki})$ 、 $f_3(S_{ki})$ 分别为策略 S_{ki} 下的网络损耗、负荷均衡度和开关动作损失; $f_1(S_{ki}^*)$ 、 $f_2(S_{ki}^*)$ 、 $f_3(S_{ki}^*)$ 分别为非合作博弈时 Nash 均衡策略 S_{ki}^* 下的网络损耗、负荷均衡度、开关动作损失。

2.2 博弈策略下的多目标函数

配电网重构是在满足网络约束的条件下, 通过改变开关的状态, 使配电系统的某个或某几个指标达到最优, 从而达到减少网络损耗、均衡负荷过载以及改善节点电压水平等目的。

a. 博弈者 P_1 在策略 S_{k1} 下的网络损失 $f_1(S_{k1})$ 如下:

$$\min f_1(S_{k1}) = \sum_{m=1}^M C_{m,1}^k R_m \frac{P_m^2 + Q_m^2}{U_m^2} + \sum_{n=1}^N D_{n,1}^k R_n \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \quad (14)$$

其中, M 和 N 分别为配电网络中总的联络开关和分段开关支路数; m 和 n 为相应支路编号; $P_m (P_n)$ 和

$Q_m (Q_n)$ 分别为流进支路 $m(n)$ 的有功功率和无功功率; $R_m (R_n)$ 为支路 $m(n)$ 的电阻; $U_m (U_n)$ 为支路 $m(n)$ 的首端电压。

b. 负荷均衡是指将负荷较重线路上的部分负荷转移到负荷较轻的线路上进行网络重构, 则博弈者 P_2 在策略 S_{k2} 下的负荷均衡度 $f_2(S_{k2})$ 为:

$$\min f_2(S_{k2}) = \sum_{m=1}^M C_{m,2}^k \frac{P_m^2 + Q_m^2}{(S_m^{\max})^2} + \sum_{n=1}^N D_{n,2}^k \frac{P_n^2 + Q_n^2}{(S_n^{\max})^2} \quad (15)$$

其中, $S_m^{\max} (S_n^{\max})$ 为支路 $m(n)$ 的最大复功率。

c. 配电网重构通过开断开关来实现网络寻优^[13], 为了描述开关的动作次数对博弈者 P_i 的影响, 本文将第 i 次重构选取的策略 S_{ki} 与第 $i-1$ 次重构选取的策略 $S_{k(i-1)}$ 及第 $i+1$ 次重构选取的策略 $S_{k(i+1)}$ 进行比较, 定义博弈者 P_3 在策略 S_{ki} 下的开关动作损失 $f_3(S_{ki})$ 为:

$$f_3(S_{ki}) = \begin{cases} \sum_{j=1}^N (D_{j,i}^k \oplus D_{j,0} + 0.5D_{j,i}^k \oplus D_{j,i+1}^k) & \text{第一次重构过程} \\ \sum_{j=1}^N 0.5(D_{j,i-1}^k \oplus D_{j,i}^k + D_{j,i}^k \oplus D_{j,i+1}^k) & \text{重构中间过程} \\ \sum_{j=1}^N (0.5D_{j,i}^k \oplus D_{j,i-1}^k + D_{j,i}^k \oplus D_{j,0}) & \text{最后一次重构过程} \end{cases} \quad (16)$$

其中, \oplus 表示异或运算; 在第一次重构过程中, 将开关动作损失 $f_3(S_{ki})$ 定义为策略 S_{ki} 下开关 j 的状态 $D_{j,i}^k$ 、网络重构前开关初始状态 $D_{j,0}$ 以及后一次重构博弈者 P_{i+1} 选择策略 $S_{k(i+1)}$ 时开关状态 $D_{j,i+1}^k$ 的函数; 在最后一次重构过程中, 将开关动作损失 $f_3(S_{ki})$ 定义为策略 S_{ki} 下开关 j 的状态 $D_{j,i}^k$ 和前一次重构博弈者 P_{i-1} 选择策略 $S_{k(i-1)}$ 下该开关状态 $D_{j,i-1}^k$ 以及网络重构后回到开关 j 初始状态 $D_{j,0}$ 的函数; 重构中间过程中, 开关损失 $f_3(S_{ki})$ 定义为本次重构策略 S_{ki} 下开关状态 $D_{j,i}^k$ 、博弈者 P_{i-1} 和博弈者 P_{i+1} 分别选择策略 $S_{k(i-1)}$ 和 $S_{k(i+1)}$ 时开关状态 $D_{j,i-1}^k$ 和 $D_{j,i+1}^k$ 的函数。

在不同情况下开关动作损失一般不相同或很难进行统计, 本文定义开关动作量为总降损量除以开关动作次数。

网络重构还需满足以下约束条件。

a. 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{\text{node}i} + P_{\text{DG}i} = P_{\text{Li}} + U_i \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{\text{node}i} + Q_{\text{DG}i} = Q_{\text{Li}} + U_i \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

其中, P_{nodei} 、 Q_{nodei} 分别为节点 i 注入的有功、无功功率; P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 分别为节点 i 上 DG 的有功、无功出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 上负荷的有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 与 j 之间支路的电导、电纳、电压相角差; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; N_{node} 为系统节点数。

b. 节点电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (18)$$

其中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压下限和上限。

c. 支路功率约束。

$$S_{li} \leq S_{li,\max} \quad (19)$$

其中, S_{li} 为支路 i 的功率; $S_{li,\max}$ 为支路 i 允许的最大功率。

d. 网络约束。

配电网必须为辐射状拓扑结构, 不允许出现环路与孤岛。

e. DG 出力约束。

$$P_{DG_i,\min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i,\max} \quad (20)$$

其中, $P_{DG_i,\min}$ 和 $P_{DG_i,\max}$ 分别为节点 i 上 DG 可调节功率的最小值和最大值。

当约束条件越限时, 将其计入罚函数中, 越限的多少决定惩罚力度的大小, 最后将罚函数计入目标函数中。

2.3 多目标网络重构博弈模型

根据博弈者 P_i 是否合作, 将博弈模型分为非合作博弈模型和合作博弈模型。考虑到各目标间的相互制约关系, 重点讨论网络损耗和负荷均衡度组成的博弈联盟模型。

2.3.1 “后评价”选择机制

根据决策者对各优化目标的重视程度, 本文提出如式(21)所示的收益函数 $f_4(k)$, 对备选解进行“后评价”处理。 $f_4(k)$ 中的评价因子 a 、 b 反映了决策者对不同优化目标的偏好程度。

$$\begin{cases} f_4(k) = a \frac{f_1(k) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + b \frac{f_2(k) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \\ \text{s.t. } a + b = 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $f_4(k)$ 为 Nash 解集中第 k 个非劣解的收益值; a 、 b 为评价因子; $f_1(k)$ 和 $f_2(k)$ 分别为网络损耗和负荷均衡度的第 k 个非劣解的适应度值; f_1^{\max} 和 f_2^{\max} 分别为网络损耗和负荷均衡度的最劣适应度值; f_1^{\min} 和 f_2^{\min} 分别为网络损耗和负荷均衡度最优适应度值。

2.3.2 合作博弈模型

各个博弈者各自为阵, 独立决策, 以各自的收益最大化为目标, 构建合作博弈策略模型。本文重点讨论网络损耗和负荷均衡度组成的合作博弈联盟模型, 即将博弈者 P_1 和 P_2 结为联盟 $Z_{1,2}$ (合作博弈)。

对应的收益函数表示如下:

$$\min F_{1,2}(S_{kZ_{1,2}}) = \lambda \bar{f}_4(S_{kZ_{1,2}}) + \gamma \bar{f}_3(S_{kZ_{1,2}}) \quad (22)$$

$$\bar{f}_4(S_{kZ_{1,2}}) = \frac{\sum_{i \in Z_{1,2}} f_4(S_{ki})}{\sum_{i \in Z_{1,2}} f_4(S_i^*)} \quad (23)$$

$$\bar{f}_3(S_{kZ_{1,2}}) = \frac{\sum_{i \in Z_{1,2}} f_3(S_{ki})}{\sum_{i \in Z_{1,2}} f_3(S_i^*)} \quad (24)$$

其中, $\bar{f}_4(S_{kZ_{1,2}})$ 和 $\bar{f}_3(S_{kZ_{1,2}})$ 分别为网络损耗和负荷均衡度组成联盟的前提下, 经标幺化处理后的联盟收益和开关动作损失; $S_{kZ_{1,2}}$ 为博弈者 P_1 和 P_2 所在联盟集策略; λ 、 γ 为权重因子。

综上, 博弈者为 $\{P_1, P_2\}$ 、 P_3 ; 博弈策略集为 $S_{1,2} = \{S_1, S_2\}$ 、 S_3 ; 信息集与非合作博弈模型相同; 收益函数为式(22)所示的联盟收益函数、式(12)所示的博弈者 P_3 的收益函数。

3 配电网重构编码模型

3.1 配电网简化

图 $G=(Y,E)$ 中, 与节点 y 相连的边的数目称为节点 y 的度, 记为 $d(y)$, 其中以 y 作为起点的边的数目称为出度, 记为 $d^+(y)$; 以 y 作为终点的边的数目称为入度, 记为 $d^-(y)$ 。为了在编码时减少等效边的数目, 以降低解的维度, 现对 IEEE 33 节点配电网进行如下简化:

a. 不被包含在任何环网的支路不被编码;

b. 首先闭合网络中的所有开关, 将相互连接且 $d^+(y) + d^-(y) \leq 2$ 的节点间的支路合并成 1 条支路, 其解环效果相同。

IEEE 33 节点配电网简化如图 2 所示。

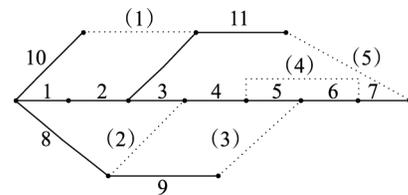


图2 IEEE 33 节点配电网简化图

Fig.2 Simplified diagram of IEEE 33-bus distribution network

3.2 编码方式

本文以二进制数 0 和 1 对联络开关的开闭状态进行编码, 0 表示断开, 1 表示闭合; 以十进制数对环网中断开的分段开关进行编码。编码的长度是网络中联络开关数的 2 倍。

粒子的编码形式如图 3 所示。图中, 1/0 表示取 1 或 0; D_{ij} 表示环网 i 中第 j 个分段开关的开闭状态。当 1/0 取 1 时, 表示环网 i 中的联络开关闭合,

D_{ij} 表示环网 i 中第 j 个分段开关断开; 当 1/0 取 0 时, D_{ij} 中的 j 取随机数, 表示环网 i 中的联络开关断开, 分段开关闭合。

1/0	D_{ij}	...	1/0	D_{ij}	...	1/0	D_{Mij}
-----	----------	-----	-----	----------	-----	-----	-----------

图 3 粒子的编码形式

Fig.3 Encoding of particles

4 重构算法的实现

传统萤火虫算法^[14]具有原理简单、参数较少等优点, 但有容易早熟、过度依赖控制参数和收敛速度较慢等缺陷。为了克服上述缺陷, 本文引入混沌理论和全局化思想, 提出一种改进萤火虫算法。

4.1 混沌理论

混沌是自然界普遍存在的非线性现象, 也是一种随机的运动^[15]。其可由确定公式推导得到, 并能在一定范围内不加重复地遍历所有存在的状态, 使其可在搜索过程中避免陷入局部最优。参数 α' 、 β' 、 γ' 在萤火虫算法寻优中起着重要的作用, 若能使这 3 个参数在一定范围内随机变化, 就可提高算法的全局寻优能力。本文采用 Logistic 映射函数对萤火虫算法的参数进行动态控制, 并对其进行如下改进:

$$x'_i = x_i + \beta'_0 e^{-\gamma'_{ij} r_{ij}^2} (x_i - x_j) + \alpha'_{(i)} \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (25)$$

$$\gamma'_{(i)} = u_1 \gamma'_{(i-1)} (1 - \gamma'_{(i-1)}) \quad (26)$$

$$\alpha'_{(i)} = u_2 \alpha'_{(i-1)} (1 - \alpha'_{(i-1)}) \quad (27)$$

本文将混沌参数设置为 $u_1 = 4$ 、 $u_2 = 4$, 3 个参数的取值范围为 $[0, 1]$, 每经过一次迭代后, Logistic 映射函数会产生一组随机参数值, 实现参数的优化控制。

4.2 全局化思想

在每次萤火虫位置的更新迭代中, 局部较亮的萤火虫个体会最大化地吸引周围的萤火虫。传统萤火虫算法寻优只考虑了局部的萤火虫亮度, 忽略了全局最优值^[16]。现将全局化思想融入萤火虫算法, 使其逃出局部最优的框架。

采用笛卡尔公式计算全局最优萤火虫与其他个体的空间距离:

$$r_m = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2} \quad (28)$$

$$x'_i = x_i + \beta'_0 e^{-\gamma'_{ij} r_{ij}^2} (x_i - x_j) + \beta'_0 e^{-\gamma'_{im} r_{im}^2} (x_m - x_j) + \alpha'_{(i)} \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (29)$$

其中, x_m 、 y_m 为全局最优值的空间位置; r_m 为全局最优值萤火虫与被吸引个体之间的空间距离。

4.3 配电网重构博弈模型求解

根据上述博弈理论建模, 将网络重构问题转化为多个博弈者之间以自身或联盟收益函数最大为目标的博弈均衡求解问题。本文采用改进萤火虫算法

进行求解, 将每个博弈策略中的开关状态视为萤火虫个体所在的位置, 将每个博弈者的收益函数视为萤火虫个体的适应度值, 通过萤火虫算法的寻优机制求解每个博弈者的最优策略。然后, 根据各个博弈者之间的博弈过程, 通过迭代求解所有博弈者的 Nash 均衡解。具体流程如下。

a. 初始化满足约束条件的算法相关参数值。

b. 建立博弈模型, 并根据萤火虫的初始位置, 即各负荷节点初始注入功率值, 计算其适应度值, 从而赋予初始萤火虫的个体亮度。

c. 生成博弈初始策略组合, 即在各博弈者的策略集中随机生成初始可行策略组合 $S = \{S_1, S_2, S_3\}$ 。

d. 根据萤火虫亮度计算吸引度和更新其位置, 并计算博弈者 P_i 的局部最优策略, 即通过牛顿拉夫逊法计算配电网的潮流, 得到博弈者 P_i 在不同策略下萤火虫个体的适应度值, 判断萤火虫种群是否满足收敛条件, 若满足收敛条件, 则得出博弈者 P_i 的局部最优策略 $S_i^* = \text{argmax} F_i(S_i^*)$; 若不满足, 则执行步骤 c。

e. 计算局部最优策略集, 即对每个博弈者 P_i 进行寻优, 得到最优策略集 $S^* = \{S_1^*, S_2^*, S_3^*\}$ 。

f. 使用混沌理论和全局化思想对算法参数进行更新。

g. 判断迭代后的值是否满足约束条件, 若满足, 则执行步骤 h; 否则迭代次数加 1 后执行步骤 c。

h. 根据亮度对萤火虫个体进行排序, 找出最亮的萤火虫位置, 并计算其适应度值。

i. 输出最优结果, 算法结束。

5 算例分析

在 MATLABR2014a 环境下, 处理器为 3.2 GHz, 内存为 8 GB 的 PC 上进行仿真, 以 IEEE 33 节点配电网作为测试算例。改进萤火虫算法的参数设置如下: 萤火虫种群个数为 40, 最大迭代次数为 500, 步长系数 $\alpha' = 0.30$, 初始吸引度 $\beta' = 0.25$, 初始光强系数 $\gamma' = 1.0$, $V_m = 3 \text{ m/s}$, $V_r = 14 \text{ m/s}$, $V_{out} = 25 \text{ m/s}$, 光伏电池方阵 $A = 2.16 \text{ m}^2$, $\eta = 13.44\%$ ^[2]。目标函数权重系数 $\alpha = 2$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$, $\lambda = 2$ 。评价因子 $a = 0.6$, $b = 0.4$, $S_{i, \max} = 6000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。IEEE 33 节点配电网有 32 条支路, 5 条联络开关支路, 1 个电源, 网络首端基准电压为 12.66 kV, 三相功率基准值取为 10 MV·A, 网络总负荷为 5 084.26+j2 547.32 kV·A, 具体参数见文献[17]。表 1 为 DG 接入情况, 设 DG 都为最大出力。

表 1 DG 安装位置和容量

Table 1 Installation position and capacity of DGs

接入节点	DG 类型	容量/kW	功率因数
4, 9, 13	风电机组	300	0.9
18, 20, 23	光伏电池	100	1.0

为了比较算法中各个部分对种群进化的影响,采用文献[18]中的算法以及本文所提改进萤火虫算法对配电网进行重构,寻找网络损耗和负荷均衡度合作博弈解。文献[18]的算法比较简单,其对每个新解都要生成一个基本环矩阵,再对基本环矩阵进行遍历,得出可行解。对 IEEE 33 节点配电网进行仿真,程序运行 40 次,耗时曲线如图 4 所示,迭代收敛曲线如图 5 所示。

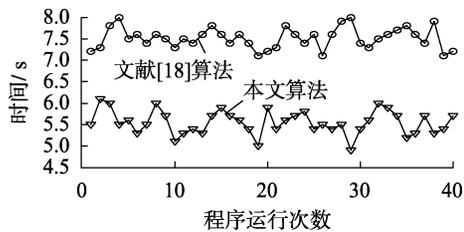


图 4 本文算法与文献[18]算法的耗时分布曲线
Fig.4 Time-consuming curves of proposed algorithm and algorithm in Reference[18]

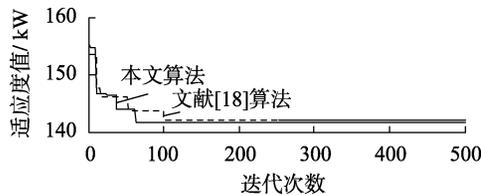


图 5 本文算法与文献[18]算法的全局极值收敛曲线
Fig.5 Global convergence curves of proposed algorithm and algorithm in Reference[18]

由图 4 可看出,文献[18]算法的平均耗时多于本文算法,这是因为文献[18]算法在每生成一个新解时都要生成一个基本环矩阵,并对其进行遍历。由图 5 可看出,本文算法的收敛速度和全局寻优能力明显优于文献[18]算法。

不含 DG 和含 DG 的 IEEE 33 节点系统的仿真结果分别如表 2、表 3 所示。从表 2、3 的仿真结果可看出,DG 对网络重构下的网络损耗和负荷均衡度均有影响,由于网络接入适量的 DG 改善了系统的潮流分布,均衡了线路负荷,使得流经线路的电流减小,减小了网络损耗。因此,含 DG 网络重构的网络损耗和负荷均衡度都较不含 DG 的网络小。

表 2 不含 DG 的 IEEE 33 节点系统仿真结果

Table 2 Simulative results of IEEE 33-bus system without DG

目标	断开支路	网络损耗/kW	负荷均衡度
重构前	7-20,8-14,11-21,17-32,24-28	202.67	2.12
网络损耗最优	5-6,13-14,8-9,31-32,24-28	142.51	1.47
负荷均衡度最优	5-6,13-14,8-9,31-32,23-24	143.05	1.42
双目标合作博弈	5-6,13-14,8-9,31-32,23-24	143.05	1.42

表 3 含 DG 的 IEEE 33 节点系统仿真

Table 3 Simulative results of IEEE 33-bus system with DG

目标	断开支路	网络损耗/kW	负荷均衡度
重构前	7-20,8-14,11-21,17-32,24-28	175.63	1.81
网络损耗最优	7-20,8-14,11-21,31-32,23-24	120.45	1.28
负荷均衡度最优	5-6,13-14,8-9,31-32,23-24	119.69	1.24
双目标合作博弈	5-6,13-14,8-9,31-32,23-24	119.69	1.24

表 3 中,当目标为网络损耗最优时,网络损耗的优化结果为 120.45 kW,大于以负荷均衡度最优为目标时网络损耗的优化结果 119.69 kW,这是因为本文算法在求解最优解时具有一定的随机性,以迭代次数为终止条件,并不能保证每次在最大迭代次数内都能搜索到最优解。分别以网络损耗最优和负荷均衡度最优作为判断指标时,最终的仿真结果不同,在网络损耗达到最优解时,负荷均衡度并不是最优。可见,两者之间具有一定的相关性,但不是一般的正负相关性。表 2 中,双目标合作博弈(网络损耗和负荷均衡度两者博弈)中网络损耗下降 29.42%,虽较以网络损耗最优为目标时的降损率 29.68%低,但其负荷均衡度降低 33.12%。相比于不含 DG 的 IEEE 33 节点系统重构,含 DG 的 IEEE 33 节点系统重构的各指标有进一步的提高,双目标合作博弈下网络损耗下降 31.85%,负荷均衡度降低 31.49%。

双目标合作博弈策略(网络损耗和负荷均衡度两者合作博弈)下最优开关动作量优化结果随开关切换次数的变化关系如图 6 所示。由图 6 可看出,当开关动作次数由 0 增加到 1 次、由 4 次增加到 5 次和由 7 次增加到 8 次时降损效果较明显,其中开关切换 1 次的效果最好,最优可降低网络损耗 98 kW,此时最小开关动作损失对应表 2 中的双目标合作博弈策略。非合作博弈和合作博弈均能够降低网络损耗和负荷均衡度,但合作博弈下开关动作次数

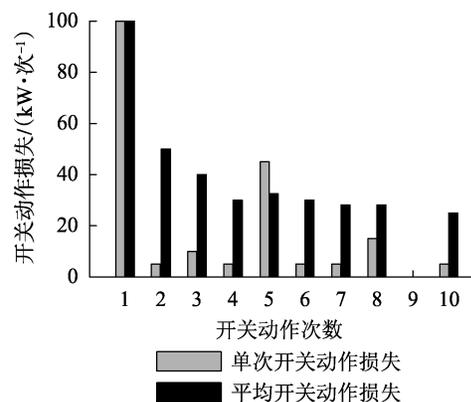


图 6 开关动作损失与开关动作次数的关系
Fig.6 Relationship between switching loss and number of switching operation

较少,电压波动情况较少,策略结果较优。

图 7 为 IEEE 33 节点配电网重构前、后的节点电压分布(图中电压为标幺值)。由图可见,不含 DG 配电网重构的平均电压水平与重构前网络相比有较大的提高,含 DG 配电网重构较不含 DG 配电网重构的平均电压水平有进一步的提升。可见,适当的 DG 接入配电网和优化重构,不仅消纳了可再生能源,也明显改善系统的各指标。

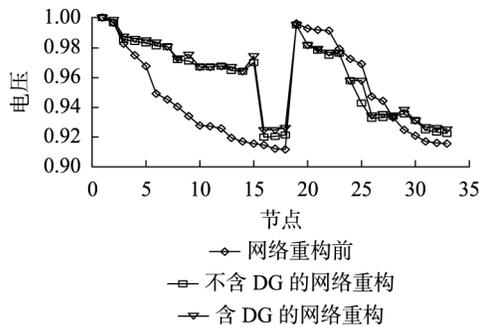


图 7 网络重构前、后的电压分布

Fig.7 Voltage distribution of network before and after reconfiguration

场景数的不同对重构优化结果有一定的影响,表 4 给出了 3 种不同场景数下的重构优化结果(表中 U_{\min} 为标幺值)。由表 4 可看出,当场景数较少时,网络损耗较高,负荷均衡度较低,运行时间较短;当场景数较多时,网络损耗较低,负荷均衡度较高,但运行时间较长;场景数的不同对节点电压基本无影响。因此,为了均衡各参数指标,本文选取场景数为 25 适宜。

表 4 各场景数下的重构结果

Table 4 Reconfiguration results with different case numbers

场景数	断开支路	网络损耗/ kW	负荷均衡度	运行时间/s	U_{\min}
10	7-20,8-14,11-21, 22-23,31-32	121.32	1.29	25.3	0.952
25	3-4,8-14,11-21, 22-23,31-32	120.13	1.27	33.1	0.952
40	3-4,8-9,11-21, 22-23,31-32	119.89	1.26	40.2	0.952

6 结论

本文针对网络重构以单一指标或双目标寻优作为静态重构优化目标和未考虑各目标间存在的相互制约关系等系列问题,提出了一种以网络损耗、负荷均衡度和开关动作损失为综合优化目标的配电网多目标重构博弈模型,该模型充分考虑了风电、光伏出力的不确定性,相比以往的重构研究,本文所提网络优化方法更符合实际决策过程。算例仿真分析表明,利用改进萤火虫算法求解多目标重构博弈模型具有较高的搜索效率,有效地提高了全局最优解的

寻优速度;适当的 DG 接入配电网和优化重构能够明显地降低网络损耗、均衡负荷以及减少开关动作量。

参考文献:

- [1] 王薪苹,卫志农,孙国强,等. 计及分布式电源和负荷不确定性的多目标配网重构[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):116-121.
WANG Xinpeng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):116-121.
- [2] 陈春,汪泓,黎灿兵,等. 含分布式风电的配电网预防性重构[J]. 电工技术学报,2013,28(9):172-177.
CHEN Chun,WANG Feng,LI Canbing,et al. Preventive reconfiguration of distribution networks with distributed wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):172-177.
- [3] 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.
- [4] MALEKPOUR A R,NIKNAM T,PAHWA A,et al. Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration in systems with wind power generators and fuel cells using the point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1483-1492.
- [5] TULADHAR S R,SINGH J G,ONGSAKUL W. A multi-objective network reconfiguration of distribution network with solar and wind distributed generation using NSPSO[C]//2014 International Conference on Green Energy for Sustainable Development. Cape Town, South Africa:IEEE,2014:1-7.
- [6] 孙惠娟,彭春华,袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):41-46.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):41-46.
- [7] 何禹清,刘定国,曾超,等. 计及可靠性的配电网重构模型及其分阶段算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):56-60.
HE Yuqing,LIU Dingguo,ZENG Chao,et al. Novel model and multistage algorithm for distribution network reconfiguration considering system reliability[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):56-60.
- [8] 李鹏,李涛,张双乐,等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微电网系统的微电源组合优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):33-38.
LI Peng,LI Tao,ZHANG Shuang,et al. Combinatorial optimization of micro-sources in standalone microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):33-38.
- [9] MOJICA-NAVA E,MACANA C A,QUIJANO N. Dynamic population games for optimal dispatch on hierarchical microgrid control[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems,2014,44(3):306-317.
- [10] 王晶,王宗礼,陈骏宇,等. 基于萤火虫优化算法的微网源-荷博弈模型及分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):7-12.

- WANG Jing, WANG Zongli, CHEN Junyu, et al. A game model for DGs-loads in microgrid based on firefly algorithm and its analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 7-12.
- [11] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [12] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
- ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [13] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.
- CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [14] WANG Hui, WANG Wenjun, ZHOU Xinyu. Firefly algorithm with neighborhood attraction [J]. Information Sciences, 2016, 12: 382-383.
- [15] YANG Xinshe, DEB S. Eagle strategy using lévy walk and firefly algorithms for stochastic optimization [J]. Study in Computational Intelligence, 2010, 284: 101-111.
- [16] ALWESHAH M, ABDULLAH S. Hybridizing firefly algorithms with a probabilistic neural network for solving classification problems [J]. Applied Soft Computing, 2015, 35(12): 513-524.
- [17] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [18] 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.

作者简介:



丁 阳

丁 阳(1994—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向为配电网智能优化与控制(E-mail: mrdingyang@hnu.edu.cn);

汪 泓(1972—),男,辽宁抚顺人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统运行与控制、高电压与绝缘技术等方面的研究;

宾 峰(1989—),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向为配电网智能优化与控制。

Multi-objective distribution network reconfiguration based on game theory

DING Yang, WANG Feng, BIN Feng, ZHOU Wu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A multi-objective reconfiguration model of distribution network based on game theory is proposed. The model takes full account of the uncertainties of wind power and photovoltaic power generation, and the objective of optimization is to reduce active loss of distribution network, balance overload and reduce the number of switching operation comprehensively. The cooperative game alliance model is established to discuss the possible relationships among the targets based on the “post-evaluation” selection mechanism, by treating the three objective functions as different players and considering their mutual restraint relationships. The improved firefly algorithm is applied to solve the model, and the final reconfiguration scheme is determined based on the fitness value. The test results of IEEE 33-bus distribution network show that the algorithm can quickly find the equilibrium solution of the multi-objective reconfiguration game model, and verify that the network reconfiguration can obviously improve the indexes of distribution network with distributed generation integrated.

Key words: distribution network reconfiguration; multi-objective optimization; game model; chaos theory; firefly algorithm