

DOI: 10.7667/PSPC1601026

一种考虑 DG 出力优化分配的配电网重构方法

毛文晋¹, 李红伟², 李超³

(1. 西南石油大学经济管理学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500;
3. 中国石油工程建设有限公司新疆石油工程设计有限公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 分布式电源接入(DG)电网将变为常态, 提出了一种考虑 DG 出力优化分配的以降低系统网损为优化目标的重构算法。首先基于 DG 的发电成本, 采用复制动态算法(Replicator Dynamics, RD)离散化求解, 经过进化博弈之后获得 DG 出力的优化分配。然后, 分三个优化过程实现配电网的优化重构求解。初始优化利用最小生成树算法寻找一个较优的初始解, 二次优化基于改进的启发式规则对候选开关进行评价得到最优开关及二次优化解。经过第三个优化过程的修正, 一般可以得到最优重构方案。算法不依赖网络的初始拓扑; 改进的启发式规则可以减少待评价候选开关的数量, 提高算法的计算效率; 而通过修正可克服环路对进化规则的影响, 得到(近似)最优解。两个典型算例结果检验了算法的有效性和可行性。

关键词: 配电网重构; 分布式发电; 复制者动态; 最小生成树; 启发式规则

A distribution system reconfiguration method considering the optimal active power dispatching of DGs

MAO Wenjin¹, LI Hongwei², LI Chao³

(1. School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Electrical Information Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Xinjiang Petroleum Engineering Co., Ltd., China Petroleum Engineering & Construction Corporation (CPECC), Karamay 834000, China)

Abstract: The integration of distributed generations (DG) into the distribution will become much more common. This paper introduces a distribution network reconfiguration method with the goal of minimizing the active power loss and considering the optimal active power dispatching of DGs. First, based on the power generation cost of DG, the optimization dynamic power dispatch of DGs is obtained with replicator dynamics (RG) based discretization's algorithm. Then, the reconfiguration is realized with three optimization procedures. The preliminary optimization gets a local optimal solution based on MST algorithm. The secondary optimization gets the alternative optimal solution based on improved heuristic rules. And during the third procedure, the optimal solution can generally be obtained through correcting the results. The algorithm does not rely on the initial network topology. Combining the local optimal solution and the improved heuristic rules, the algorithm can significantly reduce the amount of the candidate switches needed to be evaluated. The modification can overcome the influence to the heuristic rules from loops and get the (approximate) optimal solution. Two typical test systems, i.e. 33-bus system and 69-bus system, verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution system reconfiguration; distributed generations; replicator dynamics; minimum spanning tree (MST); improved heuristic rules

0 引言

配电网重构是优化配网运行的一种有效手段, 具有以下优势减少系统有功网损, 提高配网运行经

济效益, 均衡线路负载, 提高系统电压质量等^[1-2]。分布式电源(DG)具有对环境友好, 投资小, 发电方式灵活, 运行费用低等独特优势。将 DG 与大电网有机结合, 能够有效减少能耗、提高电力系统可靠性和灵活性^[3]。因此, 对含 DG 的配电网重构研究具有十分重要的现实意义。

配电网重构在数学上通常是一个大规模非凸非线性组合优化问题, 通常由以 0-1 混合整数规划方

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助(2013CB228203); 四川省统计科学研究计划项目(2014SC52); 四川省教育厅重点项目(15ZA0058)

法建模,主要方法可以分为:数学规划方法^[4-5]、启发式方法^[6-7]、人工智能优化算法^[8-10]。数学规划方法求解过程中一般要进行近似和简化处理,严重的维数灾将导致计算时间长,难以满足快速性的要求;启发式方法以其快速性得到业界的广泛关注,但其遍历搜索过程依赖节点编号顺序编程实现逻辑复杂且难以保证效果;人工智能优化算法追求全局最优的数值解,势必会采取严格意义上的纯数学规划方法(如遗传算法等),但可能存在计算效率差,耗时严重,距离实时应用的要求还较远。

而含分布式电源的配电网重构主要是在传统配电网重构方法的基础上进行改进,同时增加对各类 DG 在潮流计算中的处理,如文献[11]基于遗传算法来实现含分布式电源的配电网重构,在通过前推回代法进行潮流计算时将分布式电源作为“负”的负荷来处理。文献[12]提出基于粒子群优化算法的含 DG 配电网重构方法,在重构过程中把开关状态和 DG 注入功率作为算法控制变量同时进行处理,最终实现系统损耗和电压偏差最小的目标。文献[13]以负荷平衡指数和有功损耗最小为目标,基于蚁群算法研究含 DG 的配电网重构。文献[14]从提高 DG 的接纳能力出发,提出了以提高 DG 接纳能力为目标函数的配电网动态重构方法。文献[15]将分布式发电(DG)与静止无功补偿器(STATCOM)引入配电网模型中,采用一种改进遗传算法(GA)实现配电网重构,结果表明 DG 与 STATCOM 的引入能有效地提高配电网的供电质量和可靠性。

本文考虑 DG 引入后的重构问题,并考虑到 DG 发电的成本,采用一种基于复制动态离散化算法实现 DG 出力动态优化求解,在此基础上,以最小系统网损为目标,利用改进的启发式规则和最小生成树算法对配网进行重构,以优化配网结构,提高配网的运行经济性。算例分析验证了模型的可行性和正确性。

1 复制者动态(RD)算法

RD 算法是一种基于进化博弈论的模拟自然选择的策略,通过具有差异的适应度来调整环境中各个栖息地的个体数量^[16]。RD 算法的配电网模型为

$$\dot{p}_i = p_i(f_i(p_i) - \bar{f}) \quad (1)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{P_d} \sum_{i=1}^N p_i f_i(p_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i = P_d \quad (3)$$

式中: p_i 为分派到第 i 个 DG 的出力; $f_i(p_i)$ 为第 i

个 DG 的适应度函数,其意义为第 i 个 DG 出力为 p_i 时带来的收益; \bar{f} 为所有 DG 的平均适应度函数; N 表示 DG 的数量; P_d 为由系统供电功率缺额所决定的由 DG 提供的出力(总功率),在某个具体时刻,其值可以认为是固定值。

各 DG 的出力达到平衡点时,各 DG 的适应度函数相同(假定该时刻所有 DG 的出力之和大于系统缺口功率),有

$$f_i(p_i^*) = \bar{f}^*, i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, p_i^* 表示在经过进化博弈之后各 DG 的优化出力。由文献[16],各 DG 的适应度函数可以设置为

$$f_i(p_i) = \frac{1}{c_i} \left(1 - \frac{p_i}{P_{\text{nomi}}}\right) \quad (5)$$

式中: c_i , P_{nomi} 分别为 DG 的发电成本和额定容量,且 $c_i > 0$ 。各 DG 的出力 p_i 不能超过其该时刻出力的上限 P_{nomi} ,因此 p_i / P_{nomi} 的值小于 1,即各 DG 的适应度函数大于 0。

在 RD 算法达到平衡时,各 DG 的适应度函数相同,此时得到各 DG 出力的平衡值,但实际上该值往往很难计算,为此,文献[17]提出一种 RD 算法的离散动态模型来计算平衡值,该模型为

$$p_i[k+1] = p_i[k] \frac{1/T_s + f_i[k]}{1/T_s + \bar{f}[k]} \quad (6)$$

式中: $p_i[k]$ 为 k 次迭代下的 DG 出力, DG 出力的初值可设定为该时刻各 DG 最大出力的一半; T_s 为离散动态系统抽样时间的步长。虽然相比连续模型下的 RD 算法计算结果,离散模型的计算结果要差一些,但是通过选择足够小的,合适的步长,可以使两种方式下的计算结果相当接近。

RD 算法中的适应度函数的 $f_i(p_i)$ 也可以等效看作每个 DG 的边际成本函数,所以当系统达到平衡时,各 DG 具有相同的边际成本,即此时 DG 上网的边际电价为 \bar{f}^* ,各 DG 均实现了效益最大化。

RD 算法具有计算流程如图 1 所示。

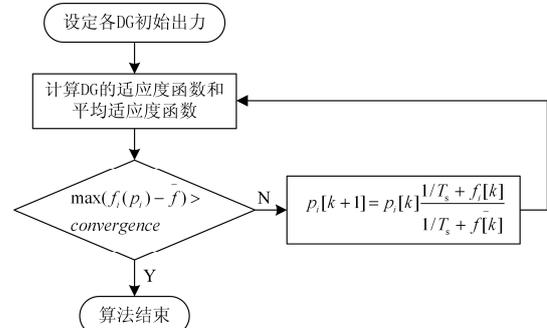


图 1 基于 RD 算法的 DG 出力优化流程图

Fig. 1 Flow-process diagram of RD method

2 最小生成树算法

2.1 最小生成树算法原理

配电网可以用一个无向图 $G \in (N, E)$ 来表示, 其中, N 为顶点集合, 表示配电网的电源点和各母线, E 为边集合, 表示配电网的各支路和联络开关, $C(e)$ 表示边的权值, $e \in E$ 。图 2 所示为一简单配电网模型, 而图 3 为该配电网对应的无向网络图。

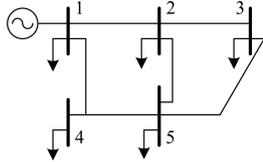


图 2 简单配电网模型

Fig. 2 A simple distribution network

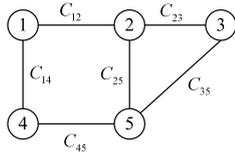


图 3 配电网对应的无向网络图

Fig. 3 Corresponding undirected graph G

配电网呈辐射状, 其可以看作是一棵以电源点为根的树, 配电网重构问题, 实质上就是找到一条满足给定约束和优化目标并且权值最小的树。本文选用 Kruskal 算法构造最小生成树。该算法的基本思想为: 首先把 n 阶连通赋权图 G 的边按权值递增顺序排列, 选择 G 中权值最小的一条边, 相继增加不会与已经选择的边构成回路的权值较小的边, 直到选出 $n-1$ 条为止。

2.2 权值确定

由文献[18]可知, 完成一次开关交换引起的网损变化的计算公式为

$$\Delta P = \operatorname{Re}\{2(\sum_{i \in D} \dot{I}_i)(\dot{E}_m - \dot{E}_n)^*\} + \dot{R}_{\text{loop}}(|\sum_{i \in D} \dot{I}_i|)^2 \quad (7)$$

式中: D 为表示发生负荷转移的母线集合; R_{loop} 为合上联络开关后环网的总电阻; \dot{I}_i 为母线 i 的复电流; \dot{E}_m, \dot{E}_n 分别为电源点到母线 m, n 的电压降之和, 在负荷转移前利用公式 $\dot{E} = \dot{R}_{\text{bus}} \dot{I}_{\text{bus}}$, 其中 \dot{R}_{bus} 为母线电阻矩阵, \dot{I}_{bus} 为母线电流向量。

当 $|\dot{E}_m| < |\dot{E}_n|$ 时 ΔP 才可能为负, 系统有功损耗才可能降低。由此可以得到以下两个启发式规则:

- 1) 只有打开开关支路两侧存在较大电压降时才有降损可能或降损明显。
- 2) 将负荷从打开开关支路的电压较低侧馈线向较高侧馈线转移才有可能降低网损。

在实际应用中, 考虑到配网一般较好的无功补偿, 可以考虑用节点的电压幅值差 $V_n - V_m$ 代替 $\dot{E}_m - \dot{E}_n$ 。基于规则 1), 最小生成树中边的权值由可由式(8)确定。

$$C(e_{i,j}) = \frac{\min(V_i, V_j)}{\max(V_i, V_j)}, \forall i, j \in N \quad (8)$$

式中, V_i 和 V_j 分别为投入所有联络开关后, 进行环网潮流计算得到的各支路两侧节点的电压幅值。

3 基于最小生成树和启发规则的重构

有功损耗最小的配电网重构模型为

$$\min f = \sum_{i=1}^{n_b} k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (9)$$

式中: n_b 为系统中的支路数; r_i 为支路 i 上的电阻; P_i 和 Q_i 分别为支路 i 流过的有功功率和无功功率; V_i 为支路 i 注入功率节点的电压; k_i 表示支路 i 的开关状态, 当支路闭合为 1, 支路断开为 0。

约束条件如下所述。

- 1) 潮流约束
- 2) 运行约束

$$\begin{cases} U_{k \min} \leq U_k \leq U_{k \max} \\ I_k \leq I_{k \max} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $U_{k \max}$ 和 $U_{k \min}$ 分别为母线 k 电压幅值的上限值和下限值; U_k 为母线 k 上的实际电压幅值; I_k 为支路 k 上的实际电流; $I_{k \max}$ 为其容许上限值。

- 3) 容量约束

$$\begin{cases} S_i \leq S_{i \max} \\ S_j \leq S_{j \max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_i 表示支路 i 上流过功率的实际值; $S_{i \max}$ 为支路 i 的功率上限值; S_j 表示变压器 j 流出的实际功率; $S_{j \max}$ 表示允许流出功率的上限值。

- 4) 网络拓扑约束

重构后配电网拓扑要满足辐射状拓扑结构, 并且不能有孤立节点存在。

为了减少候选开关数量, 根据上面启发式规则 2), 在重构过程中只需要评价处于断开开关低电压侧的开关。最优开关定义: 当候选开关满足打开该开关后的网损小于其电压较低侧邻接开关打开后的系统网损, 该开关是最优开关。这样可极大地减少候选开关的数量。

实际求解时, 可定义电压差限值 ΔV_{limit} , 如果候选开关所在支路的电压降小于 ΔV_{limit} , 那么系统没有降损可能, 该开关即为最优开关。

最优开关定义：当候选开关满足打开该开关后的网损小于其电压较低侧邻接开关打开后的系统网损，该开关是最优开关。

综合上述对候选开关的评价策略的改进，得到以下两个新的候选开关评价策略：

1) 只有打开开关支路两侧的电压降(标么值) $\Delta V > \Delta V_{limit}$ 才能有效地减少网损；

2) 若候选开关满足将负荷从电压较低侧馈线向较高侧馈线转移，即打开该开关后系统网损小于其电压较低侧邻接开关打开后的系统网损，该开关是最优开关。

重构算法包含 3 个过程：1) 初步优化(图 4)；2) 二次优化(图 5)；3) 修正(图 6)。流程见图 4—图 6。初步优化基于最小生成树算法生成一个较优的初始解，从而减少二次优化的计算量，二次优化基于改进的启发式规则得到接近最优解，而通过修正一般可获得最优的重构方案。

图中集合 DSL 存入的为初始优化结果(或二次优化的中间结果)的断开开关的编号，断开开关的数目记为 N_{tie} ；DSL 所有开关对应支路的电压降为 $[\Delta V_{tie}(i)](i=1, 2, \dots, N_{tie})$ 。图中集合 OSL 存入的为二次优化结果。

4 算例分析

本文考虑 DG 的重构算法分为两个部分：首先基于电网的功率需求并根据 DG 的发电成本和额定容量对 DG 出力进行优化调配；然后基于最小生成树和启发式规则的重构算法进行重构，算法中，把 DG 的出力作为一个负的负荷进行处理。

选择图 7 和图 8 所示改进的含 DG 的 33 母线和 69 母线系统，系统中各母线负荷以及线路的参数详见文献[19]，并将本文算法(算法 I)和文献[20]的启发式方法(算法 II)的计算结果进行对比分析。

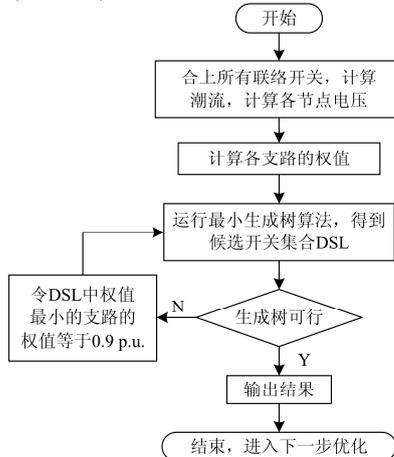


图 4 初步优化流程图

Fig. 4 Flow chart of the first procedure

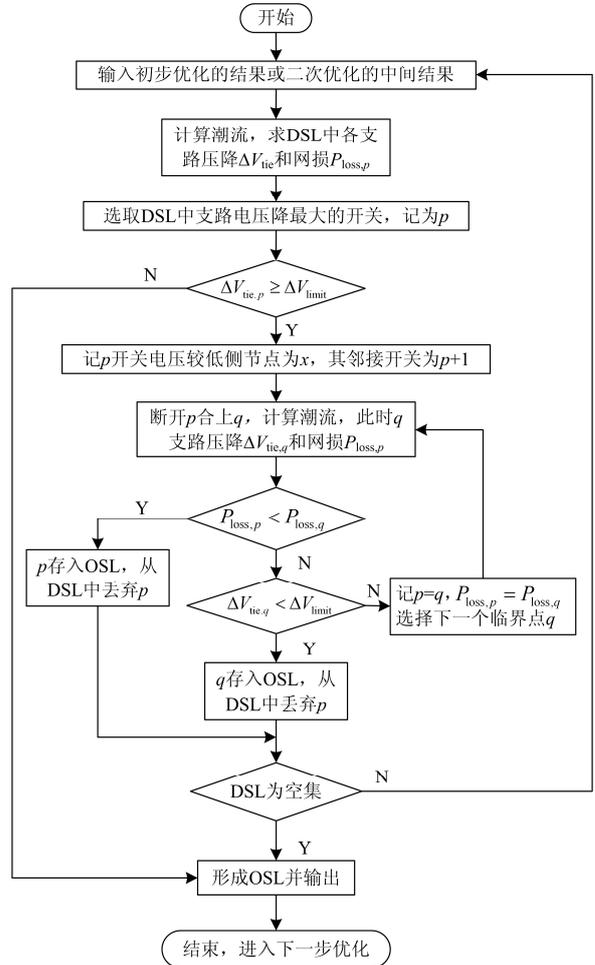


图 5 二次优化流程图

Fig. 5 Flow chart of the second procedure

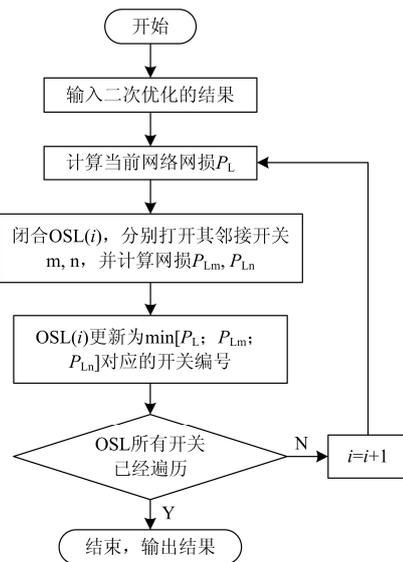


图 6 修正步骤流程图

Fig. 6 Flow chart of the third procedure

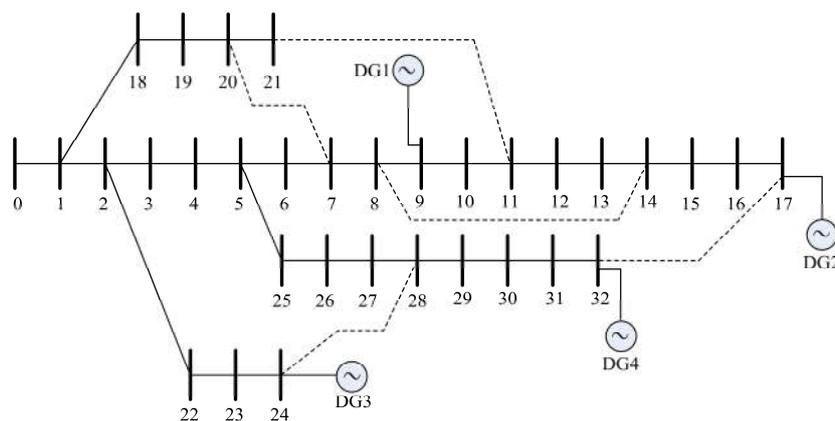


图 7 含 DG 的 33 母线测试系统

Fig. 7 33-bus test feeders system with four DGs

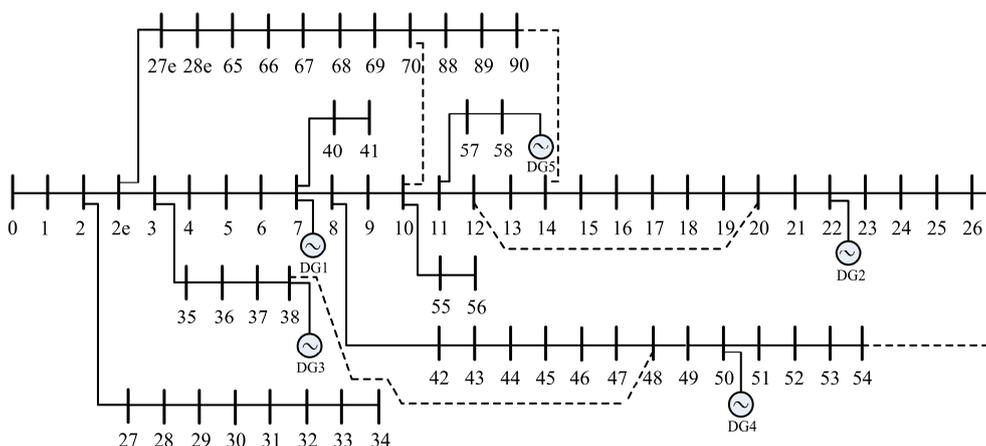


图 8 含 DG 的 69 母线测试系统

Fig. 8 69-bus test feeders system with five DGs

4.1 算例 1(33 母线系统)

该系统共有 33 个节点, 37 条支路, 其中 5 条联络支路(图 7 中虚线所示)。系统初始打开开关为 s33, s34, s35, s36 和 s37, 总有功负荷为 3715.0 kW。DG 接入位置及编号如图中所示, 假定此刻 DG 总输出占系统总负荷 20%, 即 $P_d = 743 \text{ kW}$ 。其中 DG1 的额定值为: PV 节点类型, $P=150 \text{ kW}$, $Q_{\min} = 0$, $Q_{\max} = 150 \text{ kvar}$, $U = 0.98U_B$, $c_1 = 1$; DG2 的额定值为: PQ 节点类型, $P=300 \text{ kW}$, $\cos \theta = 0.9$, $c_2 = 0.7$; DG3 的额定值为: PQ 节点类型, $P=250 \text{ kW}$, $\cos \theta = 0.9$, $c_3 = 0.5$; DG4 的额定值为: PV 节点类型, $P=200 \text{ kW}$, $Q_{\min} = 0$, $Q_{\max} = 200 \text{ kvar}$, $U = 0.98U_B$, $c_4 = 0.8$ 。

通过 RD 算法对 DG 出力进行分派后的结果如表 1 所示。此时 DG 的发电总成本为 520.133, 系统的网损为 119.01 kW。在对配电系统 DG 出力进行优化后, 对该系统进行重构后的结果见表 2。

表 1 算例 1 中 DG 出力分派结果

Table 1 Outputs of DGs for case 1

DG 编号	DG1	DG2	DG3	DG4
DG 有功出力/kW	111.33	246.38	218.21	159.04

表 2 算例 1 不同算法结果对比

Table 2 Summary of results with two methods for case1

项目	最终网损/kW	网损下降/%	计算时间/s	打开开关集合
算法 I	81.62	31.42	0.17	s7s11s14s28s31
算法 II	81.62	31.42	0.94	s7s11s14s28s31

从表 2 中的数据来看, 两种算法的计算结果相同, 显示了本文算法的有效性。从计算时间来看, 算法 I 的计算时间短, 算法 II 需要评价的开关多, 花时要长的得多, 显示了采用最小生成树算法的初步优化对提高计算效率效果明显。另外, 基于最小生成树算法的初始优化过程中, 权值是基于闭环潮

流结果求得的, 所以其重构结果不依赖于网络的初始结构。

本文 DG 优化分配计算没有考虑网络结构和电气距离, 一般配网电气接线相对较短, 通过本文 33 节点算例和后面的 69 节点算例分析可得, 网络结构和电气距离考虑与否对网损的影响没有预想的那么显著, 尤其当 DG 出力占总负荷比例增多时, 两者之间的差别很小。实际上, DG 对网损的影响主要跟其初始位置选择密切相关^[21], 越靠近负荷中心、降损效果越明显, 而 DG 接入位置一旦确定, 其出力对网损的影响与电气距离的关系就不是很大了。所以基于本文的复制动态算法解决 DG 的出力优化分派, 而利用后续的重构算法获得网损最小的网络运行架构, 两者分层既保证了计算的高效率, 又保证了 DG 出力优化分配前提下获得重构全局最优解(或接近全局最优解)。

4.2 算例 2: 69 母线系统

DG 接入位置如图 8 中所示。假定 DG 总出力占系统总负荷 25%, 即 950.55 kW。其中 DG1-DG4 参数同上述的 33 母线系统, 增加了 DG5, PQ 节点, $P=350$ kW, $\cos\theta=0.9$, $c_3=0.3$ 。

首先采用 RD 算法对 DG 出力进行分派, 结果如表 3 所示。根据此计算结果进行潮流计算, 得到系统的初始网损为 168.82 kW。在对配电系统 DG 出力进行优化后, 对该系统进行重构后的结果见表 4。从表中的数据结果来看, 可以得出与上述算例 1 相同的结论。

表 3 算例 2 中 DG 出力分派结果

Table 3 Outputs of DGs in case 2

DG 编号	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
DG 有功出力/kW	86.12	211.29	197.29	132.28	320.52

表 4 算例 2 不同算法结果对比

Table 4 Summary of results with two methods for case 2

项目	最终网损/kW	网损下降/%	计算时间/s	打开开关集合
算法 I	74.84	55.67	0.45	s14s21s562s70
算法 II	74.84	55.67	1.89	s14s21s59s62s70

5 结论

本文提出一种考虑 DG 出力优化分配的配电网优化重构算法。首先基于复制者动态算法 RD 解决 DG 发电成本最小的 DG 出力分派问题, 然后将最小生成树算法与启发式方法结合对配网进行重构, 从而实现网损最小。最小生成树的初步优化不依赖网络的初始拓扑, 同时基于其生成的初始较优解和新的启发式评价规则, 大大减少了待评价候选开关

的数量, 极大地提高了算法的计算效率。算例表明基于本文算法对含 DG 配电网进行重构可以获取重构最优解, 由于评价开关数量少, 算法具有较高的计算效率。

参考文献

- [1] 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): 1401-1408.
- [2] LIM S I, LEE S J, CHOI M S. Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1638-1643.
- [3] 丁明, 王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
DING Ming, WANG Min. Distributed generation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 31-36.
- [4] AOKI K, KUWAHARA H, SATOH T, et al. An efficient algorithm for load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1865-1872.
- [5] CHEN C S, CHO M Y. Determination of critical switches in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1443-1449.
- [6] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和载荷均衡为目标的地网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 172-178.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 172-178.
- [7] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 41-48.
LI Chenlei, WEI Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [8] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [9] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法

- 的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.
- ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [10] 邱骁奇, 胡志坚. 基于改进教与学优化算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 42-49.
- QIU Xiaoqi, HU Zhijian. Reconfiguration of distribution network based on improved teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 42-49.
- [11] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 37-40, 49.
- CUI Jinlan, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 37-40, 49.
- [12] 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.
- [13] WU Y K, LEE C Y, LIU L C, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1678-1684.
- [14] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 1-6.
- YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 1-6.
- [15] 吴忠强, 赵立儒, 贾文静. 计及 DG 与 STATCOM 的配电网重构优化策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 111-116.
- WU Zhongqiang, ZHAO Liru, JIA Wenjing. Optimal reconfiguration of distribution network with DG and STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 111-116.
- [16] PANTOJA A, QUIJANO N. A population dynamics approach for the dispatch of distributed generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4559-4561.
- [17] WEIBULL J W. Evolutionary game theory[M]. London, UK: MIT Press, 1997.
- [18] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W. Reconfiguration of electrical distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [19] 王守相, 王成山. 现代配电网系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 199-204.
- [20] GOMES F V, JR CARNEIRO S, PEREIRA J L R, et al. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1373-1378.
- [21] 唐小波, 徐青山, 唐国庆. 基于“负荷质心”的分布式电源并网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 12-16.
- TANG Xiaobo, XU Qingshan, TANG Guoqing. Optimal configuration based on load centroid for distributed generation grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 12-16.

收稿日期: 2016-07-17; 修回日期: 2016-09-08

作者简介:

毛文晋(1976—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为计量经济学, 电力市场等; E-mail: mwj@swpu.edu.cn

李红伟(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为配电系统自动化、智能控制等。E-mail: lhwmail@126.com

(编辑 姜新丽)