

计及分布式电源接入的配电网优化调度方法研究

高艳丰¹, 闫红艳¹, 曾凡斐²

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 分布式电源广泛接入配电网带来的功率波动性容易影响电网稳定运行, 为保证配电网的稳定、经济运行, 提出一种基于改进二进制粒子群算法的配电网优化调度方法。以风力发电接入为例, 建立了有功功率损耗最小的配电网优化调度的数学模型, 并辅以相应的约束条件。利用前推回代法进行配电网的潮流计算, 并运用改进二进制粒子群算法将潮流计算程序和优化程序嵌套在一起, 完成配电网的结构重构, 实现电源资源的优化调度。MATLAB 实例仿真证明, 计及分布式电源接入的配电网, 通过电网结构优化, 可以提高电网节点电压, 减少电网有功损耗。分析表明, 基于改进二进制粒子群算法的配电网优化调度方法是可行的, 可以提高电网的稳定和经济运行。

关键词: 分布式电源; 配电网; 优化调度; 潮流计算; 电网重构

Research on optimal dispatching method of distribution network considering distributed generation access

GAO Yanfeng¹, YAN Hongyan¹, ZENG Fanfei²

(1. School of Water Conservancy and Hydropower Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Economic and Technical Research Institute, Jinan 250021, China)

Abstract: The power fluctuation caused by the wide access of distributed generation to the distribution network is easy to cause problems in the stable operation of the power network. In order to ensure the stable and economical operation of distribution network, an optimal dispatching method based on improved binary particle swarm optimization algorithm is proposed in this paper. Taking wind power access as an example, the mathematical model of optimal distribution network scheduling with minimum active power loss is established, and the corresponding constraint conditions are supplemented. The power flow calculation of the distribution network is carried out by using the backward and forward method, and the power flow calculation program and optimization program are nested together by using the improved binary particle swarm optimization algorithm. which can complete the structural reconstruction of the distribution network and realize the optimal scheduling of power resources. Matlab example simulation proves that the distribution network with distributed power access can improve the voltage of the network nodes and reduce the active power loss of the network through network structure optimization. The analysis shows that the optimal dispatching method based on the improved binary particle swarm optimization algorithm is feasible and can improve the stability and economic operation of the power network.

Key words: distributed generation; distribution network; optimal dispatching; flow calculation; grid reconstruction

0 引言

我国“十四五”期间是电力能源转型的关键时期，要实现碳达峰、碳中和的“3060”目标，发展可再生能源发电势在必行，分布式电源接入配电网也将随处可见^[1-2]。随着可再生能源的大规模接入，产生的功率波动必然会给电网的安全稳定运行带来影响^[3-4]，要实现电源与负荷需求的实时平衡，保证配电网的经济稳定运行，研究分布式电源接入的配电网优化运行具有重要的意义。

可再生能源接入的目的是以更低成本维持电网的实时功率平衡。通过对电网资源进行优化调度，改变配电网的结构，限制电网功率波动^[5-6]。文献[7-10]利用粒子群优化算法对IEEE 69节点系统进行仿真，分析了含有分布式电源配电网的特点，提出基于无迹变换的随机潮流计算方法，解决了风力发电的波动影响和电动汽车充电不稳定的问题。文献[11-12]分析了分布式电源接入配电网对电能质量和保护装置动作情况的影响，通过改变接线方式，提出了一种新型自适应电流保护方法，因策略制定过程中考虑因素较多，计算时间较长。文献[13-14]研究了微电网中分布式电源接入的优化管理，应用小生境进化免疫算法解决了分布式电源的协调控制问题。文献[15-19]针对多个或多种电源接入电网进行优化配置，建立了多方面考虑的数学模型，运用遗传算法、粒子群算法制定优化调度方案，利用IEEE 33节点模型仿真验证了方案的准确性，但分布式电源的暂态特性亟需解决。文献[20-21]通过改变联络开关的状态，对含分布式电源的配电网结构进行重构，以有功功率网损最小为目标函数，利用改进的二进制粒子群算法提高电压，降低有功损耗，但计算效率不够高效。因此，配电网优化问题中的求解时间和求解效率等问题亟需改进，还有进一步研究空间。在配电网中如何优化调度分布式电源投切仍是当前的一个研究热点。

在上述研究基础上，本文研究了风电接入配电网的优化调度问题，建立了配电网有功网损最

低的目标函数模型，采用前推回代法对给定配电网进行潮流计算，通过改进二进制粒子群算法^[22-24]将潮流计算程序和优化程序嵌套在一起，利用环路解码的思想实现配电网结构重构，完成分布式电源接入配电网的优化调度。通过电网仿真分析，验证了基于改进二进制粒子群算法的配电网优化调度方法的正确性和计算效率。

1 配电网优化调度目标函数模型

风力发电具有间隙性和波动性的特征，研究风电接入配电网优化调度的目的是保证配电网实时功率平衡，且能稳定经济运行。电网资源优化调度，实际上是通过改变配电网的结构来实现的，目标是减少电网损耗（包括有功损耗、无功损耗），提高供电的可靠性，改善电压质量等。

根据电网调度的实际需要，可建立一个或多个方面的目标函数，采用不同的数学模型进行求解，最终的结果略有差别，但在一定程度上呈现出一致性。为降低系统运行的总体经济成本，以有功功率损耗最小为目标函数，数学模型如下

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^N R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

式中， $f(x)$ 为配电网系统有功网损； N 为网络支路总数； R_i 、 P_i 、 Q_i 和 U_i 分别为第 i 条支路的电阻、有功功率、无功功率和节点处功率注入的母线电压。

辅以相应的约束条件如下

(1) 潮流约束

$$P_i + P_{DG_i} = P_{Li} + U_{Li} \sum_{j=1}^N U_j Y \quad (2)$$

$$Q_i + Q_{DG_i} = Q_{Li} + U_{Li} \sum_{j=1}^N U_j Y \quad (3)$$

式中， P_i 、 Q_i 为节点 i 处的有功、无功功率； P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 为分布式电源向节点注入的有功、无功功率； P_{Li} 、 Q_{Li} 为负荷的有功、无功功率； U_i 、 U_j 为节点 i 和节点 j 的电压； Y 为支路导纳。

(2) 电压约束

$$U_{\min} < U_i < U_{\max} \quad (4)$$

式中, $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为电压的上下限。

(3) 支路容量

$S_i < S_{i\max}$, 即小于线路所能承受的最大容量。

(4) 结构约束

网络呈辐射状, 无“孤岛”运行状态以及环路。

配电网结构为辐射状需要满足以下两个条件: ① 闭合支路数=有效节点数+1; ② 配电网中无“孤岛”运行状态。但这两个条件并非充分必要条件, 并不能以此直接判断配电网的结构是否为辐射状。

2 配电网的潮流计算方法

目前常用的潮流计算的方法有PQ分解法、牛顿-拉夫逊法和前推回代法等; 从布局上考虑, 配电网拥有闭环设计、开环运行的特点, 为辐射状结构, 电压等级较低, PQ节点相对PV节点数量上更多, R/X数值相对比较大(PQ法失效); 牛顿-拉夫逊法计算过程中收敛效率低^[25-26]; 前推回代法计算速度快, 占用内存少, 是较为合适的一种方法。

前推回代法的具体计算步骤如下:

1) 已知支路参数矩阵和节点负荷矩阵, 并将负荷节点电压赋值。 $U_{i(0)} i=1, 2, 3, \dots, n$, n 个节点, 起始迭代时将网络中的电压均默认为额定值。

2) 依据网络分布和结构特点, 从最外层末梢节点开始算起, 若其功率已知是 $P+jQ$, 则节点注入的电流为: $I_{i(0)} = \frac{S^*}{U^*} = \frac{P-jQ}{U^*}$, 电压即为该节点处的电压。

3) 继续沿着线路向里求解电流值, 非末梢电流根据基尔霍夫电流定律可得: $I_{i(0)} = \frac{S}{U_{i(0)}} + \sum_{j=1}^n I_{jn(0)}$; 该处支路电流即为节点负荷电流和其他各子支路电流之和。

4) 由上述步骤2)、3)可得所有支路电流总和, 又因为已知根节点的电压和阻抗值, 从根

节点向末端节点回代计算得出各个负荷节点的电压: $U_{\text{末端}} = U_{\text{始端}} - Z I_i(0)$ 。

5) 计算每次迭代的电压幅值差:

$$\Delta U_{(1)} = |U_{(1)} - U_{(0)}|。$$

6) 得出电压修正值中的最大值, 并列收敛判别依据

$$\max(\Delta U_{(i)}) < \varepsilon \quad (5)$$

式中, i 为迭代的次数; ε 为电压的修正量阈值, 当最大的节点电压修正值小于电压修正量阈值时, 即潮流计算到此结束, 否则继续进行迭代计算, 返回步骤2)、3)。

7) 利用前推回代法求出支路的功率和线路损耗: $S = U I^*$; $P_{\text{loss}} = \left| I_i \right|^2 R。$

计及分布式电源配电网的潮流计算, 只需要在上述步骤中作简单的改变: ① 分布式电源流向负荷的电流看作是由负荷流向分布式电源的负电流; ② 配电网因分布式电源的加入由单电源布局变为多电源布局; ③ 为便于处理, 将不同类型的节点均等效成PQ节点。

3 基于改进二进制粒子群算法的配电网优化调度方法

粒子群优化算法 (Practical Swarm Optimization, PSO) 又叫鸟群觅食算法^[21], 它是从随机解出发, 逐步迭代寻找最优解。通过改进二进制粒子群算法实现配电网的优化调度, 将已知条件 (负荷、电压、粒子群规模和迭代次数等) 列出来, 并进行以下操作:

1) 在基于环路的编码理论方法上生成 M 个解, 记录它们的初始速度与位置。

2) 判断网络结构。判断此时的配电网是否符合辐射状的要求, 若不满足, 则重新进行计算。

3) 通过前推回代法进行潮流计算, 找出每个解对应的目标值, 从而找出粒子的个体最优解 p_{best} 和总体全局最优解 g_{best} 。

4) 再找出所有解对应的目标函数, 更新粒子的个体最优解 p_{best} 和总体全局最优解 g_{best} 。

5) 当迭代若干次后,若满足结束的条件,则可输出最终结果;否则,继续进行计算。

算法流程图如图1所示。

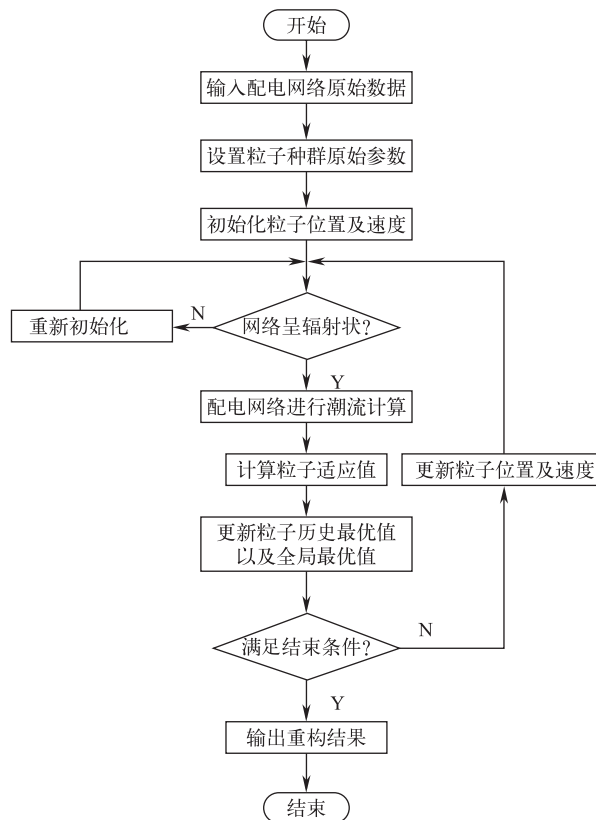


图1 改进的二进制粒子群算法流程图

Fig. 1 Improved flow chart algorithm of binary particle swarm

配电网正常运行时,应满足一定的条件:首先网络结构应为辐射状,并且不能有“孤岛”运行的情况发生;其次,每个环路有且仅有一个为“0”状态的开关,即开关为“0”的个数等于环路数。算法中使用了环路解码的思想,求解的核心思想便是粒子群的编码方式,极大地减少了不可行解出现的情况。配电网辐射状结构控制策略图如图2所示。

以IEEE 16配电网为例,如图3所示,网络中有16条支路,支路5、10和14上装有联络开关,其他支路装有分段开关,正常运行时,联络开关为“0”状态,则该集合可写为 $x_i=(1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0)$,其解的数量能达到 $2^{16}=65\ 536$ 个,故采用基于环路的编码方式,具体步骤为:

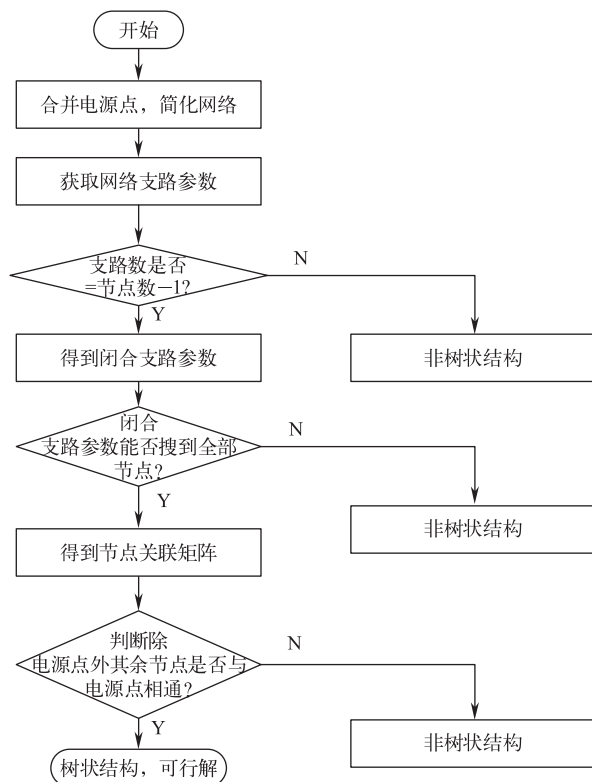


图2 配电网辐射状结构控制策略图

Fig. 2 Flow chart of ejection structure of power distribution network

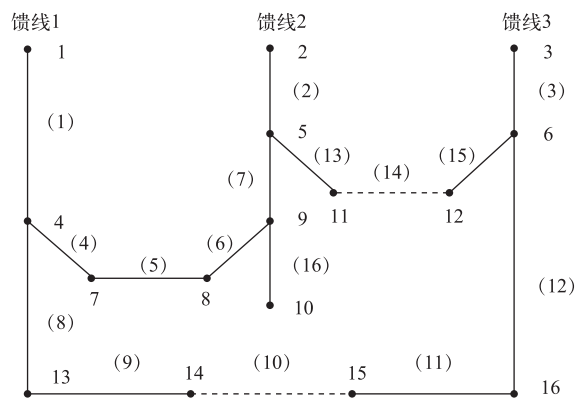


图3 IEEE 16配电网示意图

Fig. 3 Distribution network diagram of IEEE 16 node

1) 令系统中全部的分段开关为“1”(闭合)状态,联络开关为“0”(打开)状态,此时的配电网出现树状布局。

2) 基于辐射网络结构的前提下,闭合第一个联络开关,形成Loop1环路,对Loop1中所有类型的开关编号(编码是任意的),结果用变量 x_1 表示,其集合为所有的开关编号。

3) 反复上述2)中的操作步骤, 顺次闭合第2个, 第3个, …, 第 n 个联络开关, 构成Loop2, Loop3, …直至末了一个环路和各自变量的集合。

IEEE 16系统结构上可构成三个环路: 闭合开关5—Loop1, $x_1=\{$ 支路1、4、5、6、7、2上的开关 $\}$; 闭合开关10—Loop2, $x_2=\{$ 支路1、8、9、10、11、12、3上的开关 $\}$; 闭合开关14—Loop3, $x_3=\{$ 支路2、13、14、15、3上的开关 $\}$ 。

根据文献[16]作出如下简化和限制:

1) 支路16必须有效闭合(若断开则中断节点10的正常供电), 它不参与粒子的编码过程。

2) 支路1、2和3必须可靠闭合, 这样能够可靠提高算法的整体计算效率。

3) 综上所述, 集合可改为: $x_1=\{4,5,6,7\}$, $x_2=\{8,9,10,11,12\}$, $x_3=\{13,14,15\}$, 每一个环路有且只有一个开关状况为“0”。

编码列表如表1所示。

表1 化简后的编码组合
Tab. 1 Simplified coding combination

Loop1	Loop2	Loop3
4、5、6、7	8、9、10、11、12	13、14、15
1011	11011	101

由表1可知, 经简化以后, 算法的计算量减少了很多, 其计算速度得到显著的提升。

4 算例分析

以IEEE 33节点配电网为例, 如图4所示。已知系统额定电压为12.66 kV, 配电网的总负荷为3 715 kW+j2 300 kvar, 联络开关位于8-21、9-15、12-22、18-33和25-29, 平衡节点电压为1.0 (pu), 每一个支路上均装设有分段开关。粒子群算法参数规定: 粒子种群数量大小为50, 学习因子 $C_1=C_2=2$, 最大迭代次数为100, $U_{\max}=4$ 。

通过配电网重构, 基于MATLAB平台仿真得出各节点重构前后的电压情况, 如图5所示。

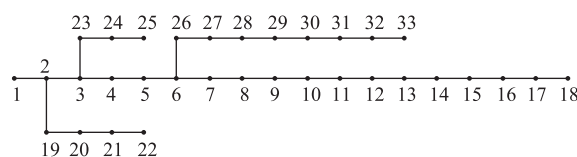


图4 IEEE 33节点配电网示意图

Fig. 4 Distribution network diagram of IEEE 33 node

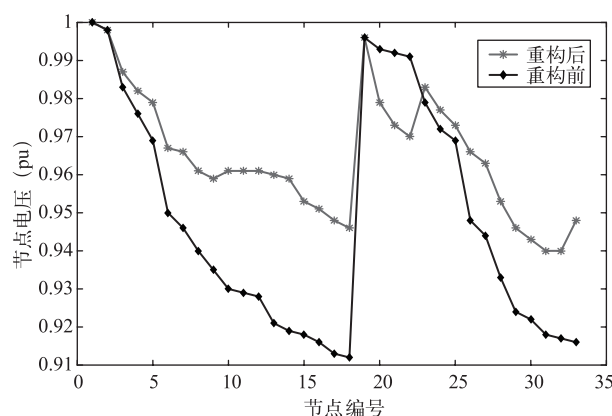


图5 不含DG的IEEE 33节点配电网重构前后节点电压

Fig. 5 Before and after node voltage of IEEE 33 node
distribution network reconstruction without DG

由图5可知, 配电网重构之后, 整体节点位置向着平衡节点的位置集中, 电压值得到明显的改善。这说明网络重构即通过联络开关进行一系列的操作, 电网结构得以优化, 使节点电压水平得到了明显的改善。

在计及分布式电源接入的情况下, 算例中接入4台分布式电源DG1、DG2、DG3和DG4, 额定容量分别为60 kW、100 kW、200 kW和250 kW, 如图6所示。分布式电源功率因数分别为0.85、0.9、0.9和0.8, 按照电源应装设在负荷节点较重的原则, 它们依次位于节点5、节点9、节点26和节点31处, 将它们看作PQ节点。

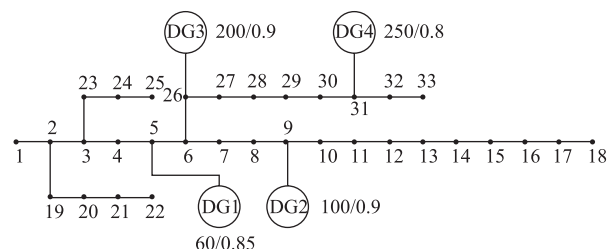


图6 接入分布式电源后的配电网示意图

Fig. 6 Distribution network diagram after access to distributed power supply

接入分布式电源后, 已知分布式电源并网总量要小于系统最大负荷的25%, 故: $P_{DGmax} = P_{max} \times 25\% = 3\,750 \times 0.25 = 928.75 \text{ kW}$

以有功功率网损最小为目标函数, 对配电网进行重构, 如图7所示。

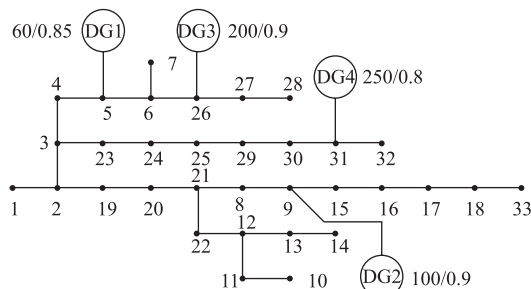


图7 分布式电源接入后的配电网重构示意图

Fig. 7 The reconstruction distribution network diagram with distributed power participation

分布式电源接入配电网前后, 分别进行系统潮流计算及有功功率网损分析, 各节点电压值如图8所示。DG接入配电网重构前后的总损耗如表2所示。是否接入DG的配电网重构前后节点电压变化情况如图9所示。DG接入后的网损收敛曲线如图10所示。

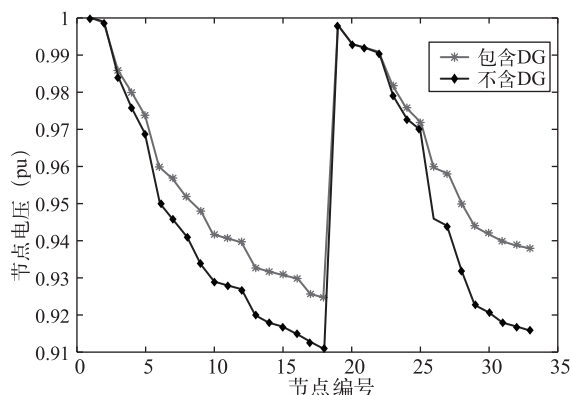


图8 DG接入后配电网重构前后节点电压

Fig. 8 DG node voltage after reconfiguration of the distribution network

表2 重构前后总损耗

Tab. 2 Total active loss before and after reconstruction

(单位: kW)

重构前	重构后	加入 DG 重构后
202.647 1	142.128 2	139.473 1

从图8中分析可知, 随着分布式电源的接入, 虽然可能造成功率的波动, 但是其会对配电网的安全稳定运行起到积极的作用, 在一定程度上提高了系统的电压值, 降低了电压的波动幅度, 改善了电能质量。此处尚未对分布式电源进行选址定容, 配电网的最优运行状态也随着DG安装位置和容量的变化而变化。

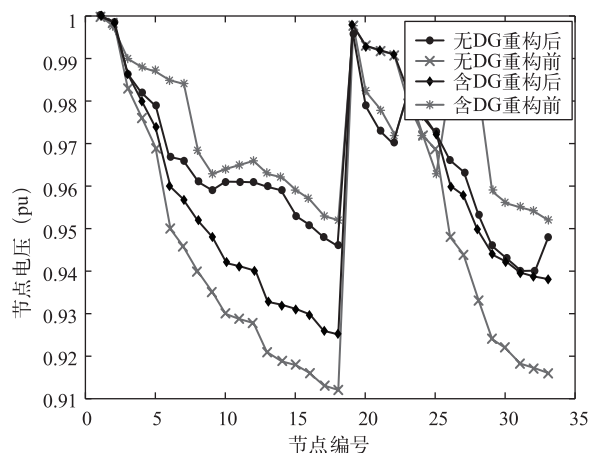


图9 配电网重构前后节点电压变化情况

Fig. 9 Changes of node voltage before and after distribution network reconfiguration

在分布式电源接入配电网的情况下, 节点电压受分布式电源接入的影响比较大, 对比有无分布式电源以及重构前后系统的节点电压情况可知, 配电网重构后的IEEE 33节点系统中有24个节点的电压值得到不同程度的改善, 占系统节点总数的72.7%, 电压改善最明显的为28节点, 另外有5个节点电压下降、平衡节点与2号节点保持不变。使用标准粒子群算法时, 最低节点电压为0.943 6 (pu), 网络损耗减少了60.513 5; 应用改进的粒子群算法求解时, 最低节点电压为0.952 5 (pu), 网络损耗减少了63.174, 对系统改善作用明显。

对比标准粒子群算法与改进后的粒子群算法, 对节点系统进行了100次实验, 前者有80次收敛至全局最优解, 平均迭代次数为40次; 后者有97次收敛至全局最优解, 平均迭代次数为28次。这表明, 采用改进后的算法是合理有效的, 它具备了更优的收敛效果与整体稳定性。

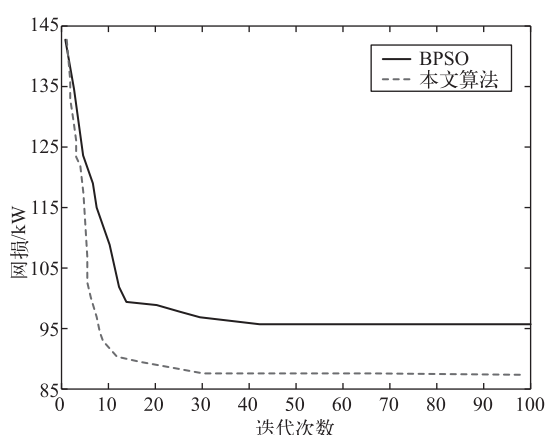


图 10 DG 接入后的网损收敛曲线

Fig. 10 Network loss convergence curve after DG access

5 结束语

建立配电网有功功率网损最小的目标函数，采用前推回代法进行潮流计算，对分布式电源接入配电网优化运行，得出以下结论：

1) 基于改进后的二进制粒子群优化算法，利用环路的编码理论进行配电网的重构，减少了网络中各节点编码的复杂操作，提高了运算效率。

2) 在考虑分布式电源的情况下，利用IEEE 33节点模型仿真，对比配电网重构前后结果，通过优化调度可以提高节点电压，减少网络中的有功损耗。

3) 在上述基础上，可进一步研究多目标函数及配电网处于动态时的优化运行状态。

参考文献

[1] 李琼慧. 新能源进入高比例时代, 大电网与微网互补共生[J]. 能源, 2021(7): 37-38.

[2] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.

[3] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.

[4] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power

Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.

- [5] 韩笑, 周明, 李庚银. 基于无迹变换随机潮流建模的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 9-17.
- [6] 杨文荣, 吴海燕, 李练兵, 等. 配电网中基于人工鱼群算法的分布式发电规划[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 156-162.
- [7] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
- [8] PILLAI J R, BAKJ B. Integration of vehicle-to-grid in the western danish power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 12-19.
- [9] HETZER J, YU D C. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [10] 王林川, 梁峰, 李漫, 等. 含有分布式电源配电网重构算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 41-44.
- [11] 李利凤, 孙婉婉, 杨乐, 等. 含分布式电源的配电网自适应电流改进方案[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 242-244.
- [12] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 含分布式电源的配电网中电池储能系统运行策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 59-65.
- [13] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
- [14] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护和控制, 2009, 37(20): 79-83.
- [15] 杨琦, 张建华, 刘自发, 等. 风光互补混合供电系统多目标优化设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 86-90.
- [16] 梁海峰, 林嘉麟, 李鹏. 含分布式能源直流配电网的优化调度[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 123-127, 159.
- [17] 董军, 陈小良, 张婧. 计及分布式电源的电网调

- 度模型研究[J]. 华东电力, 2009, 37(5): 724-729.
- [18] KENNEDY J, EBERHART RCA. Discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]. IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetic, 1997: 4101-4108.
- [19] 张勇, 罗滇生, 范幸, 等. 非解析复变电力系统动态无功点优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 28-34.
- [20] 邱正美, 马丽, 张建华. 基于Tabu-PSO的含分布式发电配电网重构[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(10): 39-41.
- [21] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50-55.
- [22] 朱勇, 陶用伟, 李泽群, 等. 基于随机约束粒子群算法的配电网重构[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(1): 122-129.
- [23] 李世光, 孟凡涛, 赵沙沙, 等. 蚁群与小波粒子群算法结合优化配电网重构[J]. 现代电子技术, 2019, 42(1): 124-128, 133.
- [24] 李倩倩, 李绍铭, 闫成忍. 基于改进粒子群和遗传算法的配电网重构研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2018, 28(4): 46-52.
- [25] 唐小波, 徐青山, 唐国庆. 含分布式电源的配网潮流算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 34-39.
- [26] ZHU Y, TOMSOVI C K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.

作者简介

高艳丰(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源电力系统。

闫红艳(1980—), 女, 通讯作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统的稳定与控制、新能源电力系统。

曾凡斐(1996—), 女, 硕士, 研究方向为配电网优化规划, 电力系统运行分析与控制。

(收稿日期: 2021-06-16)