基于改进粒子群算法的含 DG 配电网无功优化

鲁裕婷[1]，赵天乐[1]，都洪基[1]，朱鑫要[2]
（1. 南京理工大学自动化学院，江苏 南京 210094；
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，江苏 南京 211103）

摘　要：含分布式电源（DG）配电网的无功优化是一个复杂的非线性优化问题，文中采用改进的粒子群算法（PSO）对配电网进行无功优化计算，建立以系统网损和电压平均偏离最小为目标函数，节点电压和电容器投切容量为约束条件的优化模型。在 PSO 中引入位置方差防止 PSO 陷入局部最优解，根据种群中粒子的适应度值对粒子进行变异处理，在保证算法收敛速度的基础上，改善算法性能。以含分布式电源的 IEEE14 节点配电系统为例进行无功优化分析，结果表明 DG 能增强电网运行的稳定性，所提算法具有较好的优化性能。

关键词：无功优化；改进粒子群算法；位置方差
中图分类号：TM727　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3203（2018）06-0069-06

0　引言

分布式电源（distributed generation，DG）是一种新兴的供电电源，采用分布式发电具有投资小、灵活、高效、环保、能调节电网负荷峰谷差等优点[1-3]，但是越来越多的 DG 接入配电网，改变了原有系统的潮流分布，影响系统的电压、损耗以及可靠性等[4-6]。通过对系统进行无功优化，可以提高电网稳定性，有效地降低网损，因此研究 DG 的无功优化有重要意义[7]。

电力系统的无功优化问题在数学上是一个非线性和多约束的规划问题，可通过建立相应的无功优化数学模型进行求解。文献[8]建立了以降低地区电网网损、抑制电压波动为综合目标的地区电网模糊动态无功优化调度模型。文献[9]建立了含 DG 配电网络多目标无功优化模型。传统的粒子群算法（particle swarm optimization，PSO）结构简单，参数调节较少，但是局部收敛性较差。文献[10]改进了 PSO，对算法中的粒子进行量化处理，通过蒙特卡罗仿真确定粒子的位置。该方法能有效改善算法收敛性差的问题，但计算时间较长。文献[11]在 PSO 算法的基础上加入了蚁群算法（ACO），首先用 PSO 进行寻优，将寻优到的结果作为 ACO 的初始解继续寻找最优解，这种混合 PSO-ACO 算法收敛性能较好，并且缩短搜索时间。文献[12]在 PSO 的基础上进行分群和裂变，保持粒子的多样性，避免收敛早熟，又通过合群和变异，加强算法的搜索精度，提高收敛稳定性。

收稿日期：2018-07-09；修回日期：2018-08-14
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51607092）

文中在 PSO 的基础上进行改进，引入位置方差改善算法容易陷入局部最优解的问题。选用燃气轮机组作为容量固定的 DG 代表，风力发电机组作为间歇性 DG 的代表，在 IEEE14 节点系统这两种类型的 DG，利用 MATLAB 对改进后的算法进行编程计算得到补偿地点的最佳补偿容量，以达到网损和电压质量的综合最优。

1　含 DG 的无功优化模型

1.1　目标函数

目标函数为网损和电压质量综合最优[13]，表示如下：

（1）系统网损：

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_k} G_{k(i,j)}\left[V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\theta_i - \theta_j)\right] \tag{1}$$

式中：N_k 为系统支路的数量；$G_{k(i,j)}$ 为支路之间的电导；V_i，V_j，θ_i，θ_j 分别为电压的幅值和相角。

通过调整电网无功的分布来降低电网有功网损是配电网无功优化的主要目标之一，保证电网的安全电压水平而不发生电压崩溃是配电网无功优化的另一个重要目标。

（2）电压平均偏离[14]：

$$V_{\text{ad}} = \frac{\lambda\sum_{i=1}^{N}|V_{Ni} - V_i|}{N} \tag{2}$$

式中：λ 为电压越界罚因子；V_i 为节点 i 实际的电压；V_{Ni} 为节点 i 的额定电压；N 为系统节点数量。

最终的目标函数应使电网有功网损最小以及节点电压平均偏移最小[13]。引入权系数 λ_1，λ_2，对

目标函数进行归一化处理，得到最终的目标函数为：

$$F_{\min} = \lambda_1 P^*_{\text{loss}} + \lambda_2 V^*_{\text{ad}} \tag{3}$$

式中：P^*_{loss} 为网损的标幺值；V^*_{ad} 为电压平均偏离的标幺值。上述模型中，电网电压水平越高，最终的目标函数值反而越小，所以该多目标模型仍能反映电网的有功网损趋于最小。

1.2 约束条件

无功优化的约束条件包括等式约束和不等式约束，等式约束即为潮流约束，如式4。

$$\begin{cases}\Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij})\end{cases} \tag{4}$$

式中：P_{is}，Q_{is} 分别为注入节点的有功功率和无功功率，注入功率包括负荷的（为负）功率，也包括补偿设备的注入无功和分布式电源的注入有功和无功；P_i，Q_i 分别为节点的计算功率；G_{ij}，B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导和电纳；δ_{ij} 为节点 i、j 之间的相位差。

不等式约束包括节点电压幅值约束、电容器的投切容量约束、燃气轮机组的有功无功输出约束、有载调压变压器的档位约束。其中，电容器的投切容量、燃气轮机组的功率输出和变压器的档位为控制变量，节点电压幅值为状态变量。燃气轮机组代表输出容量固定的DG，而有载变压器的节点被视为平衡节点，其电压也是保持不变的。所以控制变量只有电容器的投切容量，即为PSO中输出的控制变量。

节点电压约束：

$$U_{i\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i\max} \tag{5}$$

电容器的补偿容量约束：

$$0 \leqslant Q_{ci} \leqslant Q_{c\max} \tag{6}$$

式中：$U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压幅值的下限和上限；$Q_{c\max}$ 为无功补偿的最大出力。

2 改进PSO

2.1 PSO

PSO将粒子运动的每一个位置当作问题的一个解，构建适应度函数对解的优劣进行评价，对于每个粒子 X_i 有一个位置变量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$，$i \in [0, m]$，$m$ 为种群中粒子的个数，n 为解的维数。粒子在解空间中运动具有速度变量 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{in})$，在移动过程中粒子的历史最优解为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \cdots p_{in})$，全局最优解为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \cdots p_{gn})$，每个粒子根据历史最优解和全局最优解的位置更新速度变量和位置变量，粒子的速度和位置更新公式为[15-16]：

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^{k} + c_1 \text{rand}_1 (p_{id} - x_{id}^{k}) + \\ \qquad c_2 \text{rand}_2 (p_{gd} - x_{gd}^{k}) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^{k} + v_{id}^{k+1} \end{cases} \tag{7}$$

式中：v_{id}^{k}，x_{id}^{k} 分别为第 k 次迭代粒子的第 d 维的位置和速度；ω 为惯性权重；c_1，c_2 分别为学习因子；p_{id}，p_{gd} 分别为粒子局部最优解和全局最优解的第 d 维的值；rand_1、rand_2 为[0,1]区间内的随机数。

2.2 引入位置方差进行变异

PSO在求解过程中遇到很多问题，其中最严重的问题是经常陷入局部最优解[17-18]，为改善这个问题，对算法进行相应的改进。

引入位置方差，设 $\bar{X} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_n]$ 为当前粒子所在的平均位置，如式8。

$$\bar{x}_d = \left(\sum_{i=1}^{n} x_{id}\right)/m \tag{8}$$

定义粒子群的位置方差为：

$$\begin{cases} \sigma_{\text{p}}^2 = \left(\sum_{d=1}^{n} \sigma_{\text{pd}}^2\right)/n \\ \sigma_{\text{pd}}^2 = \sum_{i=1}^{m} (x_{id} - \bar{x}_d)^2/mf \end{cases} \tag{9}$$

变量 f 起限制 σ_{pd}^2 的作用，其取值为：

$$f = \begin{cases} \max|x_{id} - \bar{x}_d|, \max|x_{id} - \bar{x}_d| > 1 \\ 1, \max|x_{id} - \bar{x}_d| \leqslant 1 \end{cases} \tag{10}$$

如果粒子群的位置方差很大，表明种群中的粒子很分散，这种情况下不容易陷入局部最优解。一般情况下，随着计算的进行，种群的位置方差越小，表明粒子逐渐向着一个解移动，这个解可能是全局最优解，也可能是一个局部最优解，因此有必要采取一定的变异算法，使粒子位置发生突变，避免整个种群陷入局部最优解。

设第 k 次迭代中粒子 x_i 的适应度值为 f_i，所有粒子的适应度平均值为 f_{av}，全局最优粒子的适应度值为 $f_{\min}$。根据全局最优粒子适应度值与某粒子当前适应度的比值 σ，将粒子划分为3类：第一类粒子的适应度较好；第二类粒子的适应度相对较好；第三类粒子的适应度较差。

设定当种群的位置方差 σ_{p}^2 小于1/7时，按照以下3种方式对不同适应度比值的粒子采取变异。

（1）对于适应度较好的粒子（$\sigma_2 \leqslant \sigma \leqslant 1$），取 $\sigma_2 = 0.9$，这类粒子可能位于全局最优解附近，也可能位于局部最优解附近，对速度进行变异：

$$v_{id} = (2\text{rand} - 1)V_{d\max} \tag{11}$$

(2) 对于适应度相对较好的粒子($\sigma_1<\sigma<\sigma_2$),取 $\sigma_1=1.5\times10^{-10}$,粒子向着种群的全局最优解移动,放宽粒子的适应度值,使粒子向更广阔的空间分布,避免种群陷入局部最优解,对粒子速度和位置都进行变异:

$$\begin{cases} v_{id} = (2\text{rand} - 1)V_{d\min} \\ x_{id} = x_{\min} + \text{rand}(x_{\max} - x_{\min}) \end{cases} \tag{12}$$

(3) 对于适应度很差的粒子($0<\sigma\leqslant\sigma_1$),对粒子的速度和位置进行变异:

$$\begin{cases} v_{id} = (2\text{rand} - 1)V_{d\max} \\ x_{id} = x_{\min} + \text{rand}(x_{\max} - x_{\min}) \end{cases} \tag{13}$$

2.3 改进 PSO 流程

应用改进的 PSO 进行含 DG 的配电网无功优化,其编程包括两个方面的内容:一是含 DG 的潮流计算编程,二是改进 PSO 编程,实现流程见图 1。

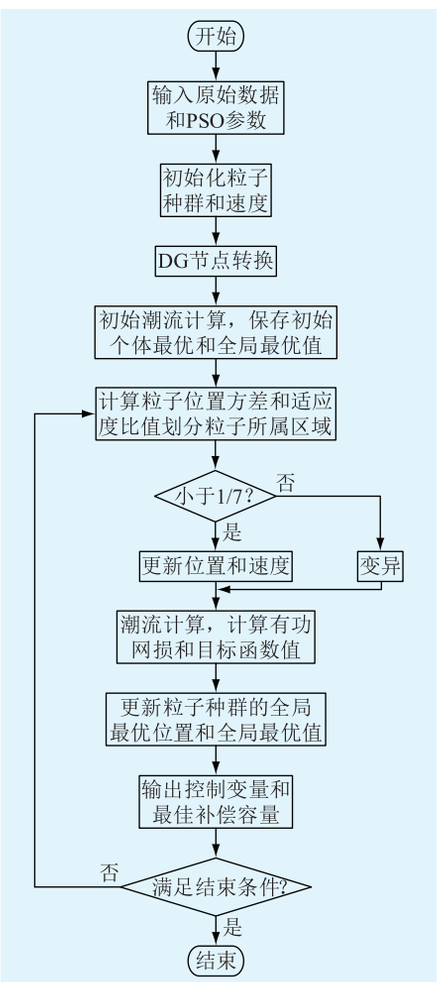


图 1 无功优化算法流程

Fig.1 Flow chart of reactive power optimization algorithm

3 算例分析

计算的基本模型选取 IEEE14 节点配电网模型,这里将调换原来模型的第 1 个节点编号和第 14 个节点。在 10 节点接一台燃气轮机组,额定容量为 2 MW,0.8 Mvar,其容量保持不变;风力发电机组接第 1 个节点,共有 3 台机组,每台机组的额定容量为 700 kW。并联电容器的安装位置为节点 5、6、9、11、13,如图 2 所示。

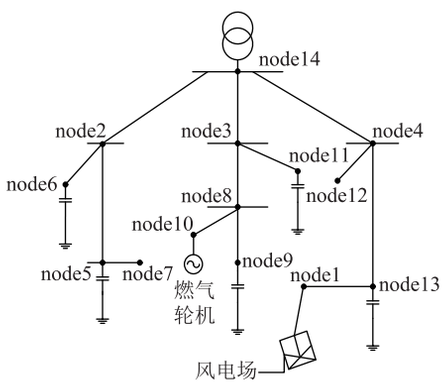


图 2 IEEE14 节点的配电网模型

Fig.2 Distribution network model of IEEE14 node

以 100 MV·A 为基准容量,基准电压为网络的额定电压 23 kV,节点 14 为潮流计算的平衡节点。目标函数部分,电压越限的罚因子取 3,网损的权系数取 0.8,网络电压平均偏差权系数取 0.2。具体的无功优化结果如表 1 所示。

表 1 各电容器最佳补偿容量

Tab.1 Optimum compensation capacity of each capacitor

燃气轮机组输出/MW	风电机组有功/MW	补偿容量/Mvar				
		节点 5	节点 6	节点 9	节点 11	节点 13
额定	0	0.25	0.2	5.05	2.85	3.8
额定	3×0.1	0.25	0.2	5.05	2.85	3.9
额定	3×0.2	0.25	0.2	5.05	2.85	3.95
额定	3×0.3	0.25	0.2	5.05	2.85	4.05
额定	3×0.4	0.25	0.2	5.05	2.85	4.15
额定	3×0.5	0.25	0.2	5.05	2.85	4.25
额定	3×0.6	0.25	0.2	5.05	2.85	4.35
额定	3×0.7	0.25	0.2	5.05	2.85	4.45

由于上级节点为变电站变压器的平衡节点,风力发电机组有功输出的变化只会影响该馈线相关的无功补偿装置(节点 13)的输出,同时由于其在输出有功时需要吸收无功,所以有功输出的增加也会使得附近节点的无功补偿容量增加。

系统网损和电压偏离的结果如表 2,其中第一行的数据为无无功补偿出力、DG 输出为 0 时,系统的网损和平均电压偏离;第二行为有无功补偿出力、无 DG 出力的情况;后面 7 行则为有无功补偿出力且燃气轮机组出力恒定、风力发电机组不同的有功出力对系统目标函数的影响。

表 2 目标函数计算结果

Tab.2 Result of target function

无功补偿/Mvar	燃气轮机组出力/MW	风电机组出力/MW	F	P^*_{loss}	V^*_{ad}
无	0	0	0.021 1	0.020 7	0.022 9
有	0	0	0.016 9	0.017 1	0.016 3
有	额定	3×0.1	0.013 4	0.013 5	0.013 4
有	额定	3×0.2	0.013 3	0.013 3	0.013 3
有	额定	3×0.3	0.013 1	0.013 1	0.013 2
有	额定	3×0.4	0.013 0	0.013 0	0.013 2
有	额定	3×0.5	0.012 9	0.012 9	0.013 1
有	额定	3×0.6	0.012 8	0.012 8	0.013 0
有	额定	3×0.7	0.012 7	0.012 7	0.012 9

由表 2 可见,无功补偿能有效降低系统的网损和提高电压质量,而 DG 的接入则进一步降低网损,提高系统电压水平,随着风力发电机组有功输出的增加,系统的网损也进一步减少。这是由于 DG 接入电网,减少了系统的有功流动和网损,燃气轮机组不仅能输出有功,也能输出无功,因此减少了系统无功功率的流动,提高系统的电压水平。另外,随着风力机组有功输出的增加,电压偏差也在减少,罚因子的引入使得优化结果中电压很难越限,最大程度上保证系统的电压质量和网损综合最优。

DG 出力的增加对降低网损和提高电压质量的作用比较明显,但是这并不说明 DG 出力越大越好,因为过大的 DG 出力会导致大范围的反向潮流,甚至注入上级变压器节点,这在电力系统中是不允许的。随着风力发电机组出力的增加,吸收的无功功率增加,附近的无功补偿出力也会增加,最大程度减少系统无功功率的流动,达到减少网损的目的,但容易导致部分节点电压越限,如表 3 所示。

表 3 增加 1 台风力发电机组目标函数计算结果

Tab.3 Results of target function for adding a wind turbine

无功补偿	燃气轮机组出力	风电机组有功出力/MW	F	P^*_{loss}	V^*_{ad}
有	额定	4×0.6	0.012 6	0.012 6	0.012 8
有	额定	4×0.7	0.012 5	0.012 5	0.038 2

最后将文中改进算法与标准的 PSO 算法进行对比,2 种算法分别计算了 11 次,收敛到最优解的次数和收敛到最优解的平均迭代次数如表 4 所示。

表 4 改进算法与标准 PSO 结果对比

Tab.4 Comparison between the improved algorithm and PSO

名称	收敛到最优解的次数	平均迭代次数
改进的算法	11	52.7
标准的 PSO	3	65.8

通过表 4 中的对比表明,改进算法较好地克服了标准 PSO 算法易陷入局部最优解的问题,具有较好的全局搜索能力。

4 结语

文中针对 DG 接入配电网的无功优化问题,采用计算位置方差的方法改进了 PSO 易陷入局部最优解的问题。通过对含 DG 的 IEEE14 节点配电系统进行优化仿真。结果表明,无功补偿可以降低系统的网损,提高电压质量,DG 的接入能进一步降低网损,提高系统的电压水平。对于容量较大的间歇性 DG,比如风电,其有功输出的增加会使得接入该馈线相关的无功补偿装置的补偿量增加,计算结果也验证了所提的优化算法具有较好的优化性能和实用性能。

参考文献:

[1] 吕 忠,周 强,蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(4):69-73.
LYU Zhong,ZHOU Qiang,CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control,2015,43(4):69-73.

[2] 谢海波,武小梅,林 翔,等. 含分布式电源的配电网无功优化研究综述[J]. 广东电力,2017,30(2):102-109.
XIE Haibo,WU Xiaomei,LIN Xiang,et al. Review on reactive power optimization for power distribution network with distribution generation[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(2):102-109.

[3] 韩学军,邓艳秋,张全厚. 含分布式电源的改进 PSO 算法配电网无功优化[J]. 计算机仿真,2013,30(5):125-128.
HAN Xuejun, DENG Qiuyan, ZHANG Quanhou. Study on reactive power optimization control in improved particle swarm optimization with distributed generation[J]. Computer Simulation,2013,30(5):125-128.

[4] 付英杰,江 泓,谭阳红. 基于 Pareto 最优解的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(1):18-23.
FU Yingjie,JIANG Feng,TAN Yanghong. Reactive power optimization of distribution network containing distributed generation based on pareto optimal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(1):18-23.

[5] 胡金理,刘 曼,成 涛,等. 含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电力学报,2015,30(2):117-122.
HU Jingli,LIU Man,CHENG Tao,et al. Reactive power optimization with distributed generators in distribution network[J]. Journal of Electric Power,2015,30(2):117-122.

[6] 程 杉,陈民铀,黄薏宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(10):45-50.
CHENG Shan,CHEN Minyou,HUANG Yichen. Multi-objective

reactive power optimization of distribution system penetrated with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2013, 41(10):45-50.

[7] 袁 远,陈劲操,张俊芳. 基于改进的人工鱼群算法的配电网无功优化[J]. 江苏电机工程,2010,29(3):32-34,38.
YUAN Yuan,CHEN Jincao,ZHANG Junfang. Distribution network reactive optimation based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2010(3):32-34,38.

[8] 杨素琴,罗念华,韩念杭. 分布式电源并网动态无功优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):122-126.
YANG Suqin,LUO Nianhua,HAN Nianhang. Study on dynamic reactive power optimization dispatching for a local power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control,2013,41(17):122-126.

[9] 龚莉莉,吴红斌. 基于 ACPSO 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(12):1441-1445.
GONG Lili,WU Hongbin. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation based on adaptive chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science),2014,37(12):1441-1445.

[10] 唐云辉,马跃江,王 超,等. 基于量子粒子群算法的含风电场配电网无功优化[J]. 电测与仪表,2015,52(19):79-83.
TANG Yunhui,MA Yuejiang,WANG Chao,et al. Reactive power optimization in distribution network with wind farm based on quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(19):79-83.

[11] 董海龙,奚慧兴,付立思,等. 基于混合 PSO-ACO 算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源,2017,33(1):50-56.
DONG Hailong,XI Huixing,FU Lisi,et al. Reactive Power Optimization in Distribution Network with DG Based on Hybrid PSO-ACO Algorithm[J]. Power System and Clean Energy,2017,33(1):50-56.

[12] 张庭场,耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化[J]. 电网技术,2012,36(2):158-162.
ZHANG Tingchang,GENG Guangfei. Reactive power optimization for medium voltage distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Technology,2012,36(2):158-162.

[13] 蔡尧星,粟时平,刘桂英,等. 考虑多目标优化模型的含分布式电源的无功优化[J]. 电测与仪表,2015,52(8):70-75.
CAI Yaoxing,SU Shiping,LIU Guiying,et al. Reactive power optimization consider multiple objectives optimization model with distributed generators[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(8):70-75.

[14] 雷 敏,杨万里,彭晓波,等. 基于改进简化粒子群算法的含 DG 的配电网无功优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2015,42(1):39-44.
LEI Min,YANG Wanli,PENG Xiaobo. Reactive power optimization of the distribution network with distributed generation based on improved simple PSO algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science),2015,42(1):39-44.

[15] 李 晶,王素华,谷彩连. 基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(6):60-63.
LI Jing,WANG Suhua,GU Cailian. Research of reactive power optimization control in distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control,2010,38(6):60-63.

[16] 陆 彬,赵新宇,张瑞永,等. 基于改进粒子群算法的进线档导线相间距离计算分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):108-113.
LU Bin,ZHAO Xinyu,ZHANG Ruiyong,et al. Analysis of Phase Distance of Transmission Line Based on Improved PSO Algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(2):108-113.

[17] 强国栋,高锋阳,乔 垚,等. 基于改进粒子群算法的配电网无功优化[J]. 电测与仪表,2018,55(14):21-26.
QIANG Guodong,GAO Fengyang,QIAO Yao. Reactive power optimization of distribution network based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(14):21-26.

[18] 陈 浩,王 健. 基于差分粒子群算法的变电站选址定容规划[J]. 电力工程技术,2018,37(3):118-122.
CHEN Hao,WANG Jian. The optimization of substation locating and sizing based on DEPSO algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(3):118-122.

作者简介:


鲁裕婷

鲁裕婷(1994—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划(E-mail:774736090@qq.com);

赵天乐(1995—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划(E-mail:942491376@qq.com);

都洪基(1960—),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置。

Reactive Power Optimization of Distribution Network With Distributed Generation Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

LU Yuting[1], ZHAO Tianle[1], DU Hongji[1], ZHU Xinyao[2]

(1. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Reactive power optimization in distributed network with distributed generation is a complex nonlinear optimization problem. In this paper, the improved particle swarm optimization algorithm is used for the reactive power optimization of distribution network. The optimization model is established with the minimum system loss and average deviation of voltage as the objective function and the node voltage and capacitor switching capacity as the constraints. The position variance is introduced into the particle swarm optimization to prevent the particle swarm algorithm from falling into the local optimal solution. The particle is mutated according to the fitness value of the particle in the population, and the performance of algorithm is improved on the basis of guaranteeing the convergence speed of the algorithm. IEEE14 node distribution system with distributed generation as an example is simulated, the results demonstrate that distributed generation can enhance the stability of the power grid and the algorithm has better optimization performance.

Key words: reactive power optimization; improved particle swarm optimization algorithm; location variance

(编辑　杨卫星)

(上接第 32 页)

Regional Monthly Load Forecast Based on EEMD-ARIMA Model

GUO Jianpeng[1], SHE Yingling[2], WEN Buying[2]

(1. State Grid Fujian Integrated Energy Services Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: Load forecasting is the basis for planning of the grid. The accuracy of the forecast is related to the safe, reliable and economic operation of the grid. In order to solve the problem of low prediction accuracy due to the unstable original data, this paper proposes an ARIMA prediction model based on the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), which performs the noise processing on the monthly load of a certain area, and then performs empirical mode decomposition to make the components smoothed. Each component is predicted by ARIMA model. Finally, the component prediction results are added to obtain the final predicted value. The example shows that the prediction accuracy of the regional monthly load of the EEMD-ARIMA model is higher than that of the ARIMA model.

Key words: ensemble empirical mode decomposition; ARIMA model; monthly load forecast

(编辑　胡昊明)

(上接第 48 页)

A Frequency-tuned Resonant System for PD Measurement and Withstand Test

LU Yuxin[1], LI Bo[2], ZHI Yawei[2], CHEN Yufei[1], ZENG Xiaoming[1], YAN Yuan[1]

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi′an Jiaotong University), Xi′an 710049, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: XLPE cables have become an important part of urban transmission and distribution networks in recent years. As cable systems become more complex, simple withstand voltage test can not meet the needs of cable fault detection. However, the traditional frequency-tuned resonant system has a large amount of pulse interference, which makes it impossible to use for partial discharge (PD) measurement. It introduces an improved frequency-tuned resonant system, using pulse width modulation and time domain elimination to achieve PD measurement and withstand test at the same time. The effectiveness of the system is verified by experiments.

Key words: XLPE cables; frequency-tuned resonant system; partial discharge; pulse width modulation; time domain elimination

(编辑　钱　悦)