

基于改进蝙蝠算法的含分布式电源配电网 无功优化

姚艳, 高飞翎, 周子旺

(宁波市电力设计院有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要:针对分布式电源接入传统配电网后,导致传统配电网的网络损耗增加和节点电压偏差增大等问题,提出一种计及分布式电源并网逆变器无功输出的优化策略。首先建立含分布式电源的配电网无功优化模型;然后基于前代回推算法计算配电网的潮流分布;进而利用改进蝙蝠优化算法对模型进行求解,有效地避免了求解陷入局部最优解,获得了分布式电源并网逆变器最优的无功输出;最后通过 Matlab 搭建 IEEE-33 节点含分布式电源的配电网模型进行仿真实验,仿真结果证明了所设计的无功优化策略的有效性和可行性。

关键词:分布式电源;电压偏差;网络损耗;前代回推;改进蝙蝠算法;无功优化

中图分类号:TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24174

Reactive Power Optimization of Distribution Networks with Distributed Generations Based on Improved Bat Algorithm

YAO Yan, GAO Feilin, ZHOU Ziwan

(Ningbo Electric Power Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: Aiming at the problems of increased network loss and node voltage deviation of the traditional distribution network after the distributed generations (DGs) is connected to the network, an optimization strategy that takes into account the reactive power output of DGs grid-connected inverter was proposed. Firstly, the reactive power optimization model of the distribution network with the DGs was established, and then the power flow distribution of the distribution network was calculated based on the power flow algorithm of the previous generation. Then the improved bat optimization algorithm was used to solve the model, which effectively avoids the solution falling into the local optimal solution, and optimal reactive power output of the DGs grid-connected inverter was obtained. Finally, the IEEE-33 node distribution network model with the DGs was built through Matlab to conduct simulation experiments. The results certificate the effectiveness and feasibility of the designed reactive power optimization strategy.

Key words: distributed generations (DGs); voltage deviation; network loss; previous generation pushback; improved bat algorithm; reactive power optimization

随着工农业发展和电气化水平提高,全社会对电力的需求越来越大,然而化石能源的日益枯竭和对低碳经济的要求,各国不得不大力开发风能、光能等可再生能源^[1-2]。但是可再生能源的出力具有不确定性等特点,使得传统配电网在消纳可再生能源时,其无功就地补偿量无法确定,网络损耗和电压偏差增加。因此对含有分布式电源的配电网进行无功补偿研究具有重要意义^[3]。

在传统配电网不消纳分布式电源出力的情

况下,一般会选择静止无功补偿器、静电电容器、变压器分接头调压等装置对配电网进行无功补偿。主要遵循的原则为:就地平衡与全网平衡结合以及分散补偿与集中补偿结合^[4]。但是当配电网消纳分布式电源的出力时,其出力的不确定会对配电网的潮流分布产生影响,导致传统的离散型无功补偿方式不能快速响应。为此,亟需提出分布式电源接入传统配电网的新型无功优化补偿策略。由此,为了能更加精准地描述分布式电

基金项目:国家自然科学基金(61873159)

作者简介:姚艳(1975—),女,本科,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划,Email:965870703@qq.com

源出力的波动,文献[5]基于加权高斯混合分布和Beta分布分别构建了风力发电和光伏发电的数学模型,同时结合切片采样算法的蒙特卡洛模拟法对系统进行潮流分析,最后采用非支配排序遗传算法对该无功优化模型进行求解。文献[6]构建了连续和离散的无功补偿装置模型,考虑了风力和光伏的相关性,利用分布鲁棒优化方法实现了分布式电源无功支撑和主动配电网开关重构。文献[7]用Weibull分布和Beta分布分别构建了风力大小和光照强度的模型,然后将模型与分布式电源的出力特点相结合,使得分布式电源出力的波动性可以被预测,建立了系统全天网络损耗最小、无功补偿装置动作成本与变压器变分接头调节费用最小的无功优化模型。上述研究考虑了风力和光伏出力不确定的情况,用场景分析法进行了处理,消除了分布式电源出力的波动性给无功补偿容量带来的困难。文献[8]分析了分布式电源有功和无功输出功率特性,构建了考虑配电网经济性和安全性的多目标无功优化模型,用模拟退火粒子群融合算法对所建立的模型进行求解。文献[9]分析了分布式电源接入配电网的影响,建立了以系统有功损耗最小的目标函数,用改进的萤火虫算法对目标函数进行求解。

上述研究提出的策略无法兼顾配电网运行时电压偏差和网络损耗的要求,为此本文设计了可调整电压偏差和网络损耗权重系数的目标函数,通过改变权重系数以满足配电网不同的运行要求;利用改进蝙蝠算法进行求解,改进后的蝙蝠算法可以自适应地调节蝙蝠发出的声波响度和频度的参数,既可以保证快速地寻找到全局最优解,又可以避免在最优解附近振荡^[10]。所提策略可以在充分消纳可再生能源的同时,保持配电网的电压偏差和网络损耗满足运行要求,还可以协调分布式电源有功和无功出力的关系。

1 分布式电源建模

分布式电源并入配电网的拓扑结构如图1所示,由风机和光伏发电构成。上述装置分别通过AC/DC和DC/DC接入直流母线,然后通过并网逆变器并入配电网。

图1中, v_w 为风机装设地的风速, I 为光伏发电装置装设地的光照强度, P_w 为风机的有功输出, P_v 为光伏的有功输出, $P+jQ$ 为并网逆变器的输出。

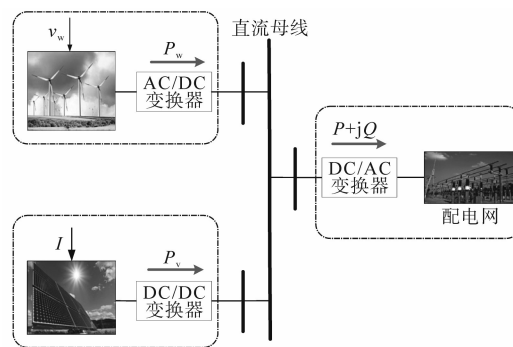


图1 分布式电源并入配电网拓扑图

Fig.1 Topology of DGs connected to distribution network

1.1 风机模型

风能以其低碳环保、分布广泛、可再生等特点被世界各国大力开发,日渐成熟的风力发电技术已经成为各国化石能源的主要替代品。风力发电的原理是:在一定的风速条件下,风力发电机的叶片开始带动转轴旋转产生动能,并由发电机将动能转化成电能。由风力发电的原理可知,风力发电机输出的功率与叶片捕获的风速大小呈正相关^[11],如下式所示:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v_w < v_{in} \\ P_N^w \frac{v_w^3}{v_n^3} & v_{in} \leq v_w < v_n \\ P_N^w & v_n \leq v_w < v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v_w \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_w = P_w \tan \varphi_w \quad (2)$$

其中

$$P_N^w = \frac{1}{2} \eta \rho \pi R^2 v_n^3$$

式中: v_{in}, v_n, v_{out} 分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速; φ_w 为风力发电机变流器的功率因数角; P_N^w 为风力发电机的额定容量; ρ 为当地的空气密度; R 为风机叶片的转动半径; η 为风机的效率,一般取 $\eta=0.3$ 。

1.2 光伏模型

与风力发电类似,光伏发电也具有分布广泛、清洁和可再生等优点,因此也被世界各国广泛使用。光伏发电的原理是:在一定的光照强度下,光电二极管会发生光生伏特效应发出电子,从而将光能转变为电能。将单个的光伏发电元件进行串联和封装保护,可形成大面积的发电板。由光伏发电的原理可知,光伏发电装置发出的功率与光照强度和环境温度相关^[12],如下式所示:

$$P_v = \begin{cases} P_N^v \frac{I}{I_m} & I < I_m \\ P_N^v & I \geq I_m \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_v = P_v \tan \varphi_v \quad (4)$$

其中

$$P_N^r = ui$$

式中: I_m 为额定光照强度; φ_v 为光伏发电装置并网逆变器的功率因数角; P_N^r 为光伏发电装置的额定输出功率; u, i 分别为光伏电池的输出电压和输出电流。

2 配电网无功优化模型

2.1 无功优化目标

配电网无功优化可以调节配电网潮流分布,保证系统中各节点电压稳定、电能质量达标,使系统能安全稳定运行,负载能可靠地工作。此外,无功优化还能降低网络损耗,提高系统运行的经济性。

设计电压偏差最小和网络损耗最低的目标函数: F_1 为节点电压偏差最小, F_2 为网络损耗最低, F_1, F_2 分别由下式表示:

$$F_1 = \min \left(\sum_{i=1}^{33} \frac{|U_i - U_N|}{|U_{imax} - U_{imin}|} \right) \quad (5)$$

$$F_2 = \min(P_{loss}) \quad (6)$$

其中

$$P_{loss} = \sum_{ij \in N} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})$$

式中: $U_i, U_N, U_{imax}, U_{imin}$ 分别为配电网节点电压、节点参考电压、节点最大允许电压和节点最小允许电压; P_{loss} 为系统的网络损耗; N 为节点数; G_{ij} 为节点 i, j 之间的电导; U_j 为节点 j 的电压; θ_{ij} 为节点 i, j 之间的电压相角差。

为了区分线路首端节点和末端节点对电压要求的不同,本文对不同节点的电压设置了不同的下限。考虑到线路上的电压降落,将线路首端节点的电压的下限设置的较大。将 U_{1min}, U_{2min} 和 U_{5min} 设置为1.05,将 U_{18min}, U_{22min} 和 U_{33min} 设置为0.85,其余节点的电压下限设置为0.9。

综合优化目标为

$$\begin{cases} F = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 \\ \omega_1 + \omega_2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_1, ω_2 分别为减小电压偏差和降低网络损耗的权重系数。

通过调节 ω_1 和 ω_2 的值可以实现不同的控制目标。

2.2 约束条件

1)潮流约束。系统中每个节点的有功功率、无功功率均应达到平衡,如下式所示:

$$\begin{cases} P_{i_sys} + P_{i_V} + P_{i_W} - P_{i_L} = 0 \\ Q_{i_sys} + Q_{i_V} + Q_{i_W} - Q_{i_L} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{i_sys}, P_{i_V}, P_{i_W}, P_{i_L}$ 分别为系统注入节点 i 的有功功率、光伏的有功功率输出、风机的有功功率输出和负载的有功消耗; $Q_{i_sys}, Q_{i_V}, Q_{i_W}, Q_{i_L}$ 分别为系统注入节点 i 的无功功率、光伏的无功出力、风机的无功出力和负载的无功消耗。

2)光伏和风机无功出力约束如下式:

$$\begin{cases} Q_{PV_min} \leq Q_{PV} \leq Q_{PV_max} \\ Q_{W_min} \leq Q_W \leq Q_{W_max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Q_{PV_max}, Q_{PV_min}, Q_{W_max}, Q_{W_min}$ 分别为光伏和风机无功出力的最大值和最小值。

光伏和风机采用PQ解耦模型^[13],即风机和光伏是通过并网逆变器并入配电网的,设并网逆变器的额定功率为 S ,则并网逆变器输出的有功功率 P 和无功功率 Q 需满足 $P^2 + Q^2 \leq S^2$,于是在无风或无光天气下,并网逆变器仍然可以输出无功,进行无功优化。

3)电流电压约束。为了保证输电线路的安全和负载的正常运行,线路流过的电流和节点电压需要保持在安全范围内,如下式所示:

$$\begin{cases} I_{ijmin} \leq I_{ij} \leq I_{ijmax} \\ U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{ijmin}, I_{ijmax} 分别为配电网节点 i, j 间的最小和最大允许电流。

2.3 前代回推法潮流计算

假设当前时刻配电网中所有节点的电压均相等,根据线路末端节点的功率,回推得到线路首端功率。根据已知的线路参数,由线路首端起向末端进行求值,以获得每个节点的电压^[14]。可概括为:逆着功率方向求功率损耗,顺着功率方向求电压降落。重复这一过程直到每个节点的电压差满足精度要求,前代回推法的优点是原理简单、计算速度快以及收敛性好。以图2所示辐射状配电网为例介绍前代回推法潮流计算的过程。

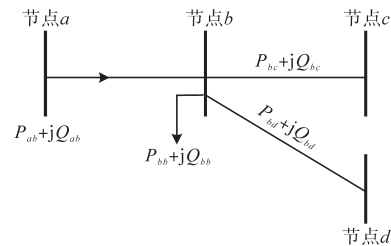


图2 配电网节点辐射图

Fig.2 Distribution network node radiation

前代回推法的计算方法如下:

$$P_{ab} = P_{bb} + P_{bc} + \Delta P_{ab} \quad (11)$$

$$\Delta P_{ab} = \frac{(P_{bb} + P_{bc})^2 + (Q_{bb} + Q_{bc})^2}{U_j^2} \times R_{ab} \quad (12)$$

$$Q_{ab} = Q_{bb} + Q_{bc} + \Delta Q_{ab} \quad (13)$$

$$\Delta U_a = \frac{P_{ab}R_{ab} + Q_{ab}X_{ab}}{U_a} \quad (14)$$

式中: ΔU_a 为节点 a 到节点 b 的电压降落; R_{ab} , X_{ab} 分别为线路 ab 上的电阻和电抗。

由式(11)~式(14)可知,线路上的有功损耗和电压降落与该线路的参数和传输功率具有一定的相关性,线路上传输的功率越大,有功损耗越大。

3 蝙蝠算法分析与实现

3.1 算法介绍

蝙蝠算法是属于启发式寻优算法之一,可以有效地搜索全局最优解^[15-16]。为了模拟蝙蝠探测目标物、躲避障碍,需要对蝙蝠的以下行为进行理想化:

1)蝙蝠全部是用回声定位的方法感知自身与目标物的距离,而且可以有效地区分目标物与障碍物。

2)蝙蝠发出可变频率 f 、波长 λ 和响度 A 的脉冲,在位置 x_i 处以速度 v_i 随机飞行寻找目标物。

3)蝙蝠根据与目标物的距离,自动调整发出脉冲的响度 A 和波长 λ 。

粒子群算法中粒子的速度仅由距离决定,而蝙蝠算法多了频率和响度属性,共同决定蝙蝠的飞行速度,速度的变化更加精准快速。改进后的蝙蝠算法可以自动调整响度和脉冲发射率,而不是从小到大逐渐减小,有效地避免了陷入局部最优。

3.2 算法模型的构建

每个蝙蝠都有其独特的波长 λ_i 、响度 A_i 和脉冲发射率 r_i 。在寻找和发现目标物的过程中,它们会不停地变化波长、响度和脉冲发射率,进行最优解的选择,直到捕获目标。在蝙蝠算法实现的过程中,每一代中第 i 个蝙蝠的位置 x_i^t 和速度 v_i^t 根据下式定义的规则进行更新^[11]:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (15)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - X_{\text{best}})f_i \quad (16)$$

其中

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (17)$$

式中: β 为一个随机向量,其元素均在 $(0, 1]$ 区间

内; X_{best} 为群体中当前最优蝙蝠的位置; f_i 为蝙蝠发出的声波频率,范围为 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 。

蝙蝠位置更新公式如下:

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A^t \quad (18)$$

式中: x_{old} , x_{new} 分别为更新前、后的蝙蝠位置; ε 为 $[-1, 1]$ 区间的一个随机数; A^t 为所有蝙蝠发出声波的平均响度。

在改进后的蝙蝠算法中,响度 A_i 和脉冲发射率 r_i 的调整参数在算法运行时能自动调整,第 i 只蝙蝠的响度 A_i^{t+1} 和脉冲发射率 r_i^{t+1} 使用下式进行更新^[17]:

$$A_i^{t+1} = \begin{cases} A_{\max}^t + \text{rand}_0(A_{\max}^t - A_{\min}^t) & \text{rand}_1 < \tau_1 \\ A_i^t & \text{others} \end{cases} \quad (19)$$

$$r_i^{t+1} = \begin{cases} r_{\max}^t + \text{rand}_0(r_{\max}^t - r_{\min}^t) & \text{rand}_2 < \tau_2 \\ r_i^t & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

式中: τ_1 , τ_2 为设定的学习速率,其数值大小决定了蝙蝠声波的响度和频度,本文取 $\tau_1 = \tau_2 = 0.1$ 。这样可以避免求解过程中陷入局部最优,增加其全局搜索能力,还可以避免因蝙蝠位移距离过大而造成的在极值点附近反复振荡的问题。

3.3 算法实现步骤

算法的具体步骤如下:

1)输入配电网结构的参数及无功优化的目标函数 F 。对蝙蝠种群规模 m 、迭代次数 N 、蝙蝠的初始速度和位置 v_i 和 x_i 、发出声波频率 f_i 和响度 A_i 进行初始化。

2)将目标函数 F 作为判断依据,标记当前种群中蝙蝠的最优位置 X_{best} ,并根据式(15)~式(17)所定义的规则更新蝙蝠的速度和位置。

3)在 $[0, 1]$ 上生成随机数 rand_1 ,如果 $\text{rand}_1 > r_i$,在最优蝙蝠中选择一个最优个体,再在最优个体附近根据式(18)生成一个局部解,否则按式(15)更新满足目标函数的新解。

4)在 $(0, 1]$ 上生成随机数 rand_2 ,如果 $\text{rand}_2 < A_i$,且目标函数的适应度值好于步骤3)中的新解,则接受该解,并根据式(19)和式(20)的规则减小 A_i 和增大 r_i 。

5)找到具有最优适应度值的蝙蝠的位置,即为当前最佳的位置 X_{best} (最优解)。

6)重复步骤2)~步骤5)。判断是否达到最大迭代次数 N ,然后输出满足目标函数的最优解。

4 仿真实验

为了验证本文设计无功优化策略的有效性,

基于 IEEE-33 节点配电网系统,设计 3 个算例进行仿真实验。算例 1 考虑分布式电源没有有功出力时,本文所提的优化算法的有效性。算例 2 考虑风光分布式电源正常有功出力时,本文所提的优化算法较其他算法的优势。算例 3 验证不同目标函数下所提无功优化策略的有效性。IEEE-33 节点配电网系统的结构如图 3 所示,分布式电源通过 AC/DC 或 DC/DC 并网逆变器接入系统,并网逆变器的额定容量为 $0.8 \text{ MV} \cdot \text{A}$,分布式电源的额定有功功率为 0.6 MW 。系统总负荷为 $3.715 + j2.315 \text{ MV} \cdot \text{A}$,电压的基准值为 12.66 kV ,该系统详细参数参见文献[18]附录 B。

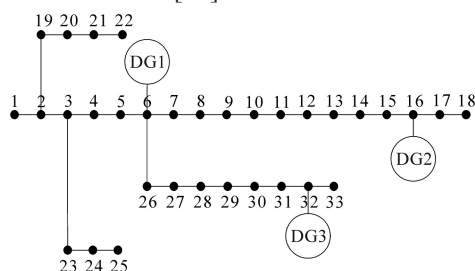


图3 改进的 IEEE-33 节点配电网系统

Fig.3 Improved IEEE-33 node distribution network

4.1 算例 1

为了验证分布式电源没有有功出力时,所提的改进蝙蝠算法较其他优化方案具有较强的优势,设置如下场景:综合目标函数中的权重系数 ω_1 和 ω_2 均设置为 0.5。并网逆变器的有功输出为 0,无功功率输出均由优化算法计算得到,各优化算法的种群规模 m 均设置为 50,迭代次数 N 均设置为 150 次。其他优化方案包括以下三种:未优化、利用粒子群算法优化和利用蝙蝠算法优化。各优化方案下并网逆变器的有功和无功输出如表 1 所示,IEEE-33 节点系统的电压总偏差和网络损耗如表 2 所示。未优化时,并网逆变器的无功功率输出设置为 0.4 Mvar 。

表 1 分布式电源没有有功出力时并网逆变器的有功无功输出的对比

Tab.1 Comparison of the active and reactive output of the converter when the distributed generations have no active power output

优化算法	无功输出/Mvar			有功输出/MW		
	节点 5	节点 15	节点 31	节点 5	节点 15	节点 31
未优化	0.4	0.4	0.4	0	0	0
粒子群优化算法	0.154 0	0.123 1	0.095 2	0	0	0
蝙蝠优化算法	0.185 3	0.100 0	0.242 8	0	0	0
改进蝙蝠优化算法	0.267 0	0.134 0	0.038 2	0	0	0

表 2 各优化方案的网络损耗和总的电压偏差(算例 1)

Tab.2 Network losses and total voltage deviation for each optimization schemes(example 1)

优化算法	网络损耗/MW	电压偏差(标么值)
未优化	0.059 5	1.553 9
粒子群优化算法	0.018 6	0.781 5
蝙蝠优化算法	0.016 8	0.647 8
改进蝙蝠优化算法	0.015 8	0.564 5

由表 2 可以看出,与未优化相比,利用粒子群算法、蝙蝠算法、改进蝙蝠算法进行优化时,网络损耗越来越小,总的电压偏差也越来越小。其中通过改进蝙蝠算法优化后的效果最好,即在一定的迭代次数下,通过改进蝙蝠算法计算得到的无功补偿量,与其他算法相比,能更好地减小电压偏差和降低网络损耗。图 4 为分布式电源的出力为 0,同时按照表 1 中的数据对 IEEE-33 节点配电网系统进行无功补偿后的各节点电压的曲线图。

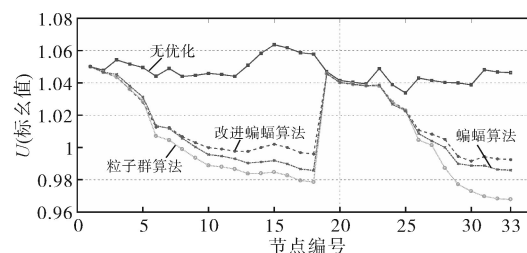


图4 各优化方案下 IEEE-33 系统节点电压曲线图(算例 1)

Fig.4 Node voltage of IEEE-33 system under each optimization schemes(example 1)

由图 4 可以看出,未优化的节点电压均大于额定电压,利用粒子群算法、蝙蝠算法、改进蝙蝠算法进行优化后,都不同程度地接近额定电压。其中,通过改进蝙蝠算法进行优化后,各节点电压最接近额定电压。

4.2 算例 2

为了验证风光分布式电源正常有功出力时,所提的改进蝙蝠算法较其他优化算法的优势,设置如下场景:综合目标函数中的权重系数 ω_1 和 ω_2 均设置为 0.5。在未对并网逆变器的输出进行优化时,为了充分消纳可再生能源,并网逆变器的有功输出等于分布式电源的额定功率 0.6 MW ,无功输出设置为 0.1 Mvar 。在利用算法对并网逆变器的输出进行优化时,为了保证并网逆变器有充足的裕量进行无功补偿,将其有功功率的输出设置为 0.4 MW ,并网逆变器的有功和无功输出如表 3 所示,各优化方案下 IEEE-33 节点的电压总偏差和网络损耗如表 4 所示。其余的无功功率的输出与算例 1 相同,均由优化算法得到。

由表4可以看出,与未优化相比,利用粒子群算法、蝙蝠算法、改进蝙蝠算法进行优化时,网络损耗越来越小,总的电压偏差也越来越小,其中通过改进蝙蝠算法优化后的效果最好。算例1和算例2都体现出本文所提算法在降低网络损耗、减小电压偏差上的优越性,这是因为分布式电源的有功出力可以减少有功功率的流动,从而减少线路上的功率损耗和电压降落。

表3 分布式电源正常有功出力时并网逆变器的有功无功输出的对比

Tab.3 Comparison of active and reactive power output of converter during normal active power output of distributed generations

优化算法	无功输出/Mvar			有功输出/MW		
	节点5	节点15	节点31	节点5	节点15	节点31
未优化	0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.6
粒子群优化算法	0.098 4	0.116 3	0.217 6	0.4	0.4	0.4
蝙蝠优化算法	0.144 3	0.091 0	0.269 8	0.4	0.4	0.4
改进蝙蝠优化算法	0.183 1	0.098 7	0.241 6	0.4	0.4	0.4

表4 各优化方案的网络损耗和总的电压偏差(算例2)

Tab.4 Network losses and total voltage deviation for each optimization schemes(example 2)

优化算法	网络损耗/MW	电压偏差(标么值)
未优化	0.022 0	1.340 5
粒子群优化算法	0.016 5	0.758 8
蝙蝠优化算法	0.015 6	0.589 8
改进蝙蝠优化算法	0.014 0	0.552 3

图5为考虑分布式电源的出力,按照表3中的数据对IEEE-33节点配电网系统进行无功补偿后的各节点电压的曲线图。由图5可以看出,与未优化相比,利用粒子群算法、蝙蝠算法、改进蝙蝠算法进行优化后,都在不同程度上减小了节点电压偏差。其中,通过改进蝙蝠算法进行优化后,各个节点的电压偏差最小。

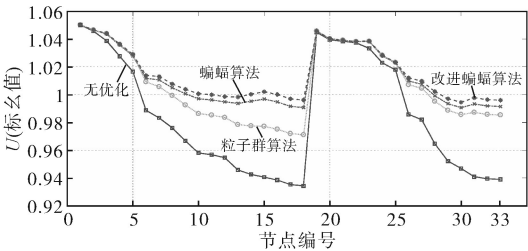


图5 各优化方案下IEEE-33系统节点电压曲线图(算例2)

Fig.5 Node voltage of IEEE-33 system under each optimization schemes (example 2)

4.3 算例3

为了体现设置不同权重系数 ω_1 和 ω_2 时,无功

补偿后配电网的优化效果不同,设计了算例3。设置两组权重系数: $\omega_1=0.7, \omega_2=0.3$ 和 $\omega_1=0.3, \omega_2=0.7$ 。与第一组权重系数对比,第二组权重系数减小了电压偏差的权重,增加了网络损耗的权重。将并网逆变器的有输出量设置为0.4 MW。表5为在这两组权重系数下的电压总偏差和网络损耗。

表5 不同权重系数下的电压总偏差和网络损耗

Tab.5 Total voltage deviation and network loss with different weighting factors

权重系数设置	网络损耗/MW	电压偏差(标么值)
$\omega_1=0.7, \omega_2=0.3$	0.014 3	0.521 0
$\omega_1=0.3, \omega_2=0.7$	0.012 8	0.624 5

由表5可以看出,当电压偏差的权重系数 ω_1 较大时,优化后总的电压偏差较小,网络损耗较大。为了保证对电压质量要求较高的负荷能安全的工作,需设置较高的电压偏差权重系数。同理,当负荷对电压质量要求不高时,为了提高系统运行的经济性可设置较高的网络损耗权重系数。

图6为在这两组权重系数下IEEE-33节点系统的各节点电压。由图6可以看出,当电压偏差的权重系数 ω_1 较大时,各节点的电压更接近额定电压。

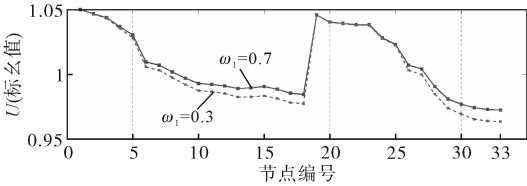


图6 $\omega_1=0.7$ 和 $\omega_1=0.3$ 时,优化无功输出后各节点电压

Fig.6 Voltage at each node after optimizing the reactive power output when $\omega_1=0.7$ and $\omega_1=0.3$

5 结论

本文建立了含分布式电源的配电网无功补偿模型,利用改进的蝙蝠优化算法,对分布式电源并网逆变器的无功功率输出量进行优化计算,达到减小电压偏差和降低网络损耗的目的。通过IEEE-33节点配电网系统进行仿真验证,结果展现了所提优化算法较其他算法的优势。同时可以通过改变目标函数的权重系数达到不同的优化目标,实现对含分布式电源配电网系统的经济调度,逐步靠近新型电力系统的建设要求。

在含分布式电源的配电网无功优化调度的后续研究工作中,将继续考虑负荷的波动性和时序性、风光出力的相关性和传统无功补偿设备的参与,为未来选择分布式电源新的接入点提供优化方案。

参考文献

- [1] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
YANG Xuhong, YIN Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [2] 米阳,王鹏,邓锦,等.孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):1-8.
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 1-8.
- [3] 夏芑,张倩,王群京,等.基于随机矩阵理论和改进粒子群优化-深度置信网络的无功优化[J].科学技术与工程,2021,21(33):14165-14172.
XIA Peng, ZHANG Qian, WANG Qunjing, et al. Reactive power optimization based on random matrix theory and improved particle swarm optimization-deep belief networks[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14165-14172.
- [4] 卢奔.含分布式电源的配电网无功配置优化[D].西安:西安石油大学,2020:10-17.
LU Ben. Optimization of reactive power configuration in distribution networks with distributed generation[D]. Xi'an: Xi'an University of Petroleum, 2020: 10-17.
- [5] 张晓英,张艺,王琨,等.基于改进NSGA-II算法的含分布式电源配电网无功优化[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):55-64.
ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [6] 阮贺彬,高红均,刘俊勇,等.考虑DG无功支撑和开关重构的主动配电网布鲁棒无功优化模型[J].中国电机工程学报,2019,39(3):685-695,948.
RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering reactive power support of DG and switch reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 685-695, 948.
- [7] 刘爱国,沈一逸,侯显国,等.基于场景法的有源配电网动态无功优化[J].广东电力,2021,34(9):18-26.
LIU A G, SHEN Y Y, HOU X G, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution networks with DGs based on scenario method[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(9): 18-26.
- [8] 陈虹.含分布式电源的配电网无功补偿优化研究[J].信息技术,2020,44(11):132-136.
CHEN Hong. Reactive power compensation optimization of distribution network including distributed power supply[J]. Information Technology, 2020, 44(11): 132-136.
- [9] 孙亮,吕凌虹,李超,等.基于改进萤火虫算法的含分布式电源配电网无功优化的研究[J].黑龙江科技信息,2016(25):133-135.
SUN Liang, LÜ Linghong, LI Chao, et al. Ji yu gai jin ying huo chong de han fen bu shi dian yuan pei dian wang wu gong you hua de yan jiu[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(25): 133-135.
- [10] FISTER Iztok, FONG Simon, BREST Janez, et al. A novel hybrid self-adaptive bat algorithm[J]. The Scientific World Journal, 2014(1-2): 709738.
- [11] 田春笋,李琼林,宋晓凯.风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):46-51.
TIAN Chunzheng, LI Qionglin, SONG Xiaokai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.
- [12] 彭生江,陆军,张中丹,等.光伏接入对电网的影响研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):157-164.
PENG Shengjing, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [13] 郑能,丁晓群,管志成,等.基于场景法的配电网有功-无功协调优化[J].电网技术,2019,43(5):1640-1651.
ZHENG Neng, DING Xiaoqun, GUAN Zhicheng, et al. Coordinated optimization of active power and reactive power in distribution network based on scenario method[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1640-1651.
- [14] 陈慧娜,杨军,高梦妍,等.基于改进前推回代的含分布式电源配电网潮流计算方法[J].自动化与仪表,2021,36(6):6-11.
CHEN Huina, YANG Jun, GAO Mengyan, et al. Power flow calculation method for distribution network with distributed generation based on improved forward and back generation[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(6): 6-11.
- [15] YANG Xinshe. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[J]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, 2010, 284: 65-74.
- [16] 许德刚,赵萍.蝙蝠算法研究及应用综述[J].计算机工程与应用,2019,55(15):1-12,31.
XU D G, ZHAO P. Literature survey on research and application of bat algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(15): 1-12, 31.
- [17] 肖辉辉,段艳明.基于DE算法改进的蝙蝠算法的研究及应用[J].计算机仿真,2014(1):272-277,301.
XIAO Huihui, DUAN Yanming. Research and application of improved bat algorithm based on DE algorithm[J]. Computer Simulation, 2014(1): 272-277, 301.
- [18] 关万琳.分布式电源优化配置与配电网重构[D].长沙:湖南大学,2014:79-80.
GUAN Wanlin. Optimal allocation of distributed power sources and reconfiguration of distribution networks[D]. Changsha: Hunan University, 2014: 79-80.

收稿日期:2022-01-26

修改稿日期:2022-02-25