

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.012

基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化

于佰建¹, 陈卓尔¹, 宋长城¹, 李慧², 王艳波³

(1. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250021; 2. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192;

3. 中国电力企业联合会电力建设技术经济咨询中心, 北京 100053)

摘要: 为了解决风电和光伏等新能源场站大规模并网时带来的电压波动及越限问题, 以及传统无功电压优化求解算法易陷入局部最优问题, 提出了基于改进萤火虫算法(IFA)的含多种新能源的地区电网无功电压优化模型。该模型以标准化的有功网损、节点电压偏差和火电机组无功出力偏差之和最小为优化目标, 以潮流计算、火电机组端电压和无功出力、变压器变比、新能源场站有功出力和静止无功补偿器出力等作为需满足的约束条件, 采用 IFA 对优化模型进行求解, 通过引入自适应步长和位置更新优化公式提高模型的计算精度和全局寻优能力。改进 IEEE-30 节点系统仿真分析表明: 所提出的优化模型可降低系统有功网损, 改善了地区电网无功分布, 同时抵制了系统电压波动, 提高了地区电网电能质量; IFA 能有效提高计算精度和速度, 提升全局寻优能力。

关键词: 新能源场站; 无功电压优化; 萤火虫算法

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)05-0093-08

Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies

YU Baijian¹, CHEN Zhuoer¹, SONG Changcheng¹, LI Hui², WANG Yanbo³

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China;

2. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

3. Technical and Economic Consulting Centre of Electric Power Construction, CEC, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to solve voltage fluctuation and off-limit problems caused by the large-scale grid connection of new energy stations such as wind power and photovoltaic, as well as the problem of traditional reactive power and voltage calculation methods easily falling into local optima, a new optimization model based on improved firefly algorithm (IFA) for the regional power grid is proposed. In this model, the sum of standardized active power losses, node voltage deviations, and reactive output deviations is used as the optimization objective. Meanwhile, regional power flow calculation, terminal voltage and reactive capacity of thermal power units, transformer ratios, active power of new energy stations and reactive power of static var compensators are used as constraints that needs to be met. Then, by using an IFA to solve the optimization model, the algorithm's computational accuracy and global optimization ability are increased by introducing new step size and position update formulas. Finally, the effectiveness of the presented model is validated using an IEEE-30 bus system. The results indicate that the proposed optimization model can reduce the active power loss of the system, improve the reactive power distribution of the regional power grid, resist the voltage fluctuation of the system, and improve the power quality of the regional power grid. IFA can effectively improve the calculation accuracy and speed, and improve the global optimization ability.

Key words: new energy stations; reactive power and voltage optimization; firefly algorithm

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3232045)

作者简介: 于佰建(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电网规划与投资计划研究。E-mail: yubaijian@163.com

通信作者: 李慧(1976—), 女, 教授, 博士, 主要从事电力系统运行与控制、新能源发电技术研究。E-mail: lhbxy@bistu.edu.cn

引用本文: 于佰建, 陈卓尔, 宋长城, 等. 基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 93-100.

YU Baijian, CHEN Zhuoer, SONG Changcheng, et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 93-100.

“双碳”目标下,为了推进我国产业转型和能源革命,风电、光伏为代表的新能源产业得到大力发展^[1-2],尤其是山东、河南、浙江、江苏以及河北等地区的新能源装机容量快速增长^[3],并且大规模上网,推动了传统化石能源向低碳清洁能源转变、传统电力系统向新型电力系统转变^[4],但是由此也引发许多新的问题。如新能源占比不断增加,导致系统潮流分布发生改变;新能源具有波动性强和间歇性突出等特点^[5],导致电网电压频繁波动,给电网的无功支撑和电压稳定带来挑战^[6]。因此,有必要开展含新能源的地区电网无功电压优化方法研究,以减少系统网损,改善电压稳定性,提高电能输送质量。

目前,国内外学者在无功电压优化控制方面展开了大量研究,并取得了一定成果。高波等^[7]提出了一种基于模拟退火策略的改进粒子群算法对无功电压优化问题进行求解,解决了传统求解方法易陷入局部最优的问题。Qiao等^[8]建立了一个多目标的电压/无功优化模型,考虑了各种无功补偿装置的贡献,但未考虑新能源的加入。随着大量的新能源接入地区电网,学者们陆续开展了含单一类型新能源的无功电压优化研究。黄大为等^[9]提出了一种计及光伏出力不确定性的配电网混合尺度无功电压控制策略,以期望网损、电压偏移和电压越限风险为优化目标,采用基于概率潮流的松弛-聚类-校正方法进行求解,但未考虑电压越限的风险。Xu等^[10]提出了一种具有下垂控制光伏逆变器的多目标分层协调VVC方法;王耀翔等^[11]提出了一种基于预测数据评估风电场可信无功调节容量的方法;任鑫等^[12]利用模糊C-means聚类方法将风电机组划分为几块区域进行无功电压控制,并利用粒子群算法对优化模型进行求解。但是,以上研究均未考虑火电机组无功出力的优化问题。吴忠强等^[13]针对主动配电网优化调度问题,建立了风能与储能系统的主动配电网优化调度模型,以平滑混合毛功率和混合净功率为目标,利用萤火虫算法(firefly algorithm, FA)进行优化求解,但该求解算法易陷入局部最优,降低了解精度。

实际工程中,光伏和风电接入同一地区电网的现象较为普遍。马庆等^[14]针对两种类型的新能源接入电网,提出了基于单/多智能体简化强化学习的电力系统无功电压控制方法,解决了现有算法离线训练速度慢、普适性不强等缺陷,但它没有综合考虑网损、电压质量和火电机组无功出力等多个优化目标。另外,光伏电站无功电压控制响应速度较快,可以利用光伏电站逆变器自身提供无功支撑^[15],直驱式风电机组也能利用网侧逆变器向电网提供一定的无功功率,但新能源场站仍是以输送有功功率为主要目的,其无功电压调节能力有限。新能源场站通常会配置静止无功补偿器(static var compensator, SVC)或静止无功发生器(static var generator, SVG)实现无功补偿,以提升系统的传输容量。

为了充分发挥新能源场站效能,改善地区电网无功分布,提高系统电压质量,本文以标准化的系统有功网损、节点电压偏差和火电机组无功出力偏差之和最小为优化目标,将地区电网潮流、火电机组端电压及无功出力、变压器变比、新能源场站有功出力、SVC装置无功出力和各节点电压限值等作为约束条件,构建含多种新能源的地区电网无功电压优化模型,并采用改进的萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA)对优化模型进行求解,以提高模型的计算精度和全局寻优能力。

1 含多种新能源的地区电网无功电压优化模型

1.1 目标函数

对于含多种新能源的地区电网无功电压优化问题,本文以标准化的系统有功网损最小为基本优化目标,同时还考虑了节点电压稳定性以及火电机组无功出力对系统有功网损产生的不同程度的影响,引入饱和函数,将标准化的PQ型节点电压偏差和PV型火电机组无功出力偏差作为优化子目标,建立新的目标函数:

$$\min f = P_{\text{loss}} + wf_v + (1 - w)f_Q \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad P_{\text{loss}} = \sum_{i,j=1}^N G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad f_v = \sum_{i=1}^{N_{\text{PQ}}} (1 - \xi(V_i))^2$$

$$\xi(X) = \begin{cases} X_{\min} & X < X_{\min} \\ X & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \\ X_{\max} & X_{\max} < X \end{cases} \quad f_Q = \sum_{k=1}^{N_G} \left(\frac{Q_{Gk} - Q_{Gk,\min}}{Q_{Gk,\max} - Q_{Gk,\min}} \right)^2$$

式中: P_{loss} 为系统有功网损; w 为电压偏差权重, $w \in (0, 1)$; f_v 为PQ型节点电压的偏差量; f_Q 为PV型火电机组无功出力的偏差量; N 为节点总数; G_{ij} 为支路*i-j*(节点*i*和*j*之间)的电导; V_i 、 V_j 分别为节点*i*和*j*的电压幅值,属于状态变量; θ_i 、 θ_j 分别为节点*i*和*j*的电压相角; N_{PQ} 为PQ型节点的个数; $\xi(\cdot)$ 为饱和函数; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$

分别为 X 的下限值与上限值; N_G 为 PV 型火电机组的个数; Q_{Gk} 为第 k 个 PV 型火电机组的无功出力,属于状态变量; $Q_{Gk,\min}$ 、 $Q_{Gk,\max}$ 分别为第 k 个 PV 型火电机组无功出力的下限值与上限值。

1.2 电力系统等式约束

为使电力系统中发电出力、负荷消耗以及线路损耗之间时刻保持平衡,含多种新能源的地区电网无功电压优化模型首先必须满足有功和无功潮流的等式约束。有功功率等式约束和无功功率等式约束分别为

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i, j \in N; i, j \neq s) \quad (2)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i, j \in N; i, j \neq s) \quad (3)$$

其中

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

式中: P_i 为节点 i 的注入有功功率; B_{ij} 为支路 $i-j$ 电纳; s 为平衡节点; Q_i 为节点 i 处的注入无功功率。

1.3 电力系统不等式约束

状态变量除了满足等式约束外,在运行时还要防止越限风险,若其值超出限值,会造成电能质量下降甚至重大电网事故,影响用户供电,因此需要对其设置不等式约束。此外,无功电压优化的对象为火电机组端电压、变压器变比、新能源场站有功出力以及 SVC 装置无功出力等电气量,这些电气量作为控制变量同样也不能超出其限值。新能源场站是以输送有功功率为主要目的,其无功电压调节能力有限,因此本文模型中的控制变量暂不考虑新能源场站自身逆变器的无功出力^[16]。

1.3.1 状态变量的不等式约束

状态变量包括系统节点电压和 PV 型火电机组无功出力,其约束条件分别为

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (i \in N) \quad (4)$$

$$Q_{Gk,\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk,\max} \quad (k \in N_G) \quad (5)$$

式中 $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为第 i 个节点电压的下限值与上限值。

1.3.2 控制变量的不等式约束

控制变量包括火电机组端电压、变压器变比、风电场有功出力、光伏电站有功出力以及 SVC 装置无功出力等,其约束条件分别为

$$V_{Gk,\min} \leq V_{Gk} \leq V_{Gk,\max} \quad (k \in N_G) \quad (6)$$

$$T_{t,\min} \leq T_t \leq T_{t,\max} \quad (t \in N_T) \quad (7)$$

$$P_{Fr,\min} \leq P_{Fr} \leq P_{Fr,\max} \quad (\tau \in N_F) \quad (8)$$

$$P_{GF\mu,\min} \leq P_{GF\mu} \leq P_{GF\mu,\max} \quad (\mu \in N_{GF}) \quad (9)$$

$$Q_{Cs,\min} \leq Q_{Cs} \leq Q_{Cs,\max} \quad (s \in N_{SVC}) \quad (10)$$

式中: V_{Gk} 为第 k 个火电机组端电压; $V_{Gk,\min}$ 、 $V_{Gk,\max}$ 分别为第 k 个火电机组端电压的下限值与上限值; T_t 为第 t 台变压器的变比; N_T 为变压器的台数; N_F 为直驱式风电场的个数; N_{GF} 为光伏电站的个数; N_{SVC} 为装设 SVC 装置的节点个数; $T_{t,\min}$ 、 $T_{t,\max}$ 分别为第 t 台变压器变比的下限值与上限值; P_{Fr} 为第 τ 个风电场的有功出力; $P_{Fr,\min}$ 、 $P_{Fr,\max}$ 分别为第 τ 个风电场有功出力的下限值与上限值; $P_{GF\mu}$ 为第 μ 个光伏电站的有功出力; $P_{GF\mu,\min}$ 、 $P_{GF\mu,\max}$ 分别为第 μ 个光伏电站有功出力的下限值与上限值; Q_{Cs} 为第 s 个 SVC 装置的无功出力; $Q_{Cs,\min}$ 、 $Q_{Cs,\max}$ 分别为第 s 个 SVC 装置无功出力的下限值与上限值。

式(1)~(10)构成了含多种新能源的地区电网无功电压优化模型,该模型属于一个非线性、强耦合、多约束的优化问题,求解难度较大,需借助群体智能优化算法进行求解。FA 通过模仿萤火虫个体的荧光吸引特性而实现位置进化,寻找目标函数最优解,属于一种元启发式群智能优化算法,它具有概念简单、鲁棒性强、所需参数较少、易于实现等优点,本文选用此算法进行含多种新能源地区电网无功电压优化模型的求解。

2 IFA

为了提高 FA 的计算精度和全局寻优能力,本文对其自适应步长和位置更新公式进行改进,采用 IFA 对含多种新能源的地区电网无功电压优化模型进行求解。①选取优化变量即火电机组端电压、变压器变比、风电场有功出力、光伏电站有功出力和 SVC 无功出力作为萤火虫个体,利用优化变量的初始潮流计算结果和需满足的约束条件(式(4)~(10)),随机生成一定数量的萤火虫个体 x_m ($m=1,2,\dots,M$),由式(1)~(3)计

算每个萤火虫个体所对应的初始目标函数值;②通过种群迭代求解更新萤火虫个体的荧光亮度和吸引度,以吸引周围萤火虫个体向亮度最强的萤火虫个体靠拢,从而寻找最亮最强的萤火虫位置和全局最优的目标函数值。该方法具有操作简单、易于全局寻优、优化效率较高等优点。IFA 的具体实现方法如下。

a. 相对荧光亮度和吸引度的计算。采用欧氏距离计算出第 K 次迭代过程中两个萤火虫个体之间的距离:

$$r_{bp,K} = \|x_{b,K} - x_{p,K}\| = \sqrt{\sum_{h=1}^d (x_{b,K,h} - x_{p,K,h})^2} \tag{11}$$

式中: $r_{bp,K}$ 为第 K 次迭代时萤火虫 x_b 到萤火虫 x_p 的距离; K 为迭代次数; $x_{b,K}$ 为萤火虫 x_b 在第 K 次迭代所处的位置; $x_{p,K}$ 为萤火虫 x_p 在第 K 次迭代所处的位置; d 为解空间搜索的维度; $x_{b,K,h}$ 为萤火虫 x_b 在第 K 次迭代时空间位置坐标的第 h 个分量。将式(11)代入式(12)计算两个萤火虫个体之间的相对荧光亮度,并利用式(13)计算萤火虫个体间的吸引度:

$$I_{bp,K}(r_{bp,K}) = I_b e^{-\gamma r_{bp,K}} \tag{12}$$

$$\beta_{bp,K}(r_{bp,K}) = \beta_0 I_{bp,K}(r_{bp,K}) / I_b \tag{13}$$

式中: $I_{bp,K}$ 为第 K 次迭代时萤火虫 x_b 到萤火虫 x_p 之间的相对荧光亮度; I_b 为萤火虫 x_b 的绝对亮度(代表萤火虫 x_b 所在位置的适应度值); γ 为光吸收强度系数(代表萤火虫的荧光会随着距离的增加和传播介质的吸收逐渐减弱,设为常数); $\beta_{bp,K}$ 为第 K 次迭代时萤火虫 x_b 对萤火虫 x_p 的吸引度; β_0 为萤火虫 x_b 初始位置的吸引度。

b. 更新萤火虫个体位置。在算法寻优过程中,萤火虫 x_b 对萤火虫 x_p 进行吸引,导致萤火虫 x_p 的位置发生变化。随着迭代次数的增加,萤火虫之间的距离不断减小,个体间的相对吸引力也在逐渐增强,从而降低了算法的局部寻优能力。虽然 FA 中位置更新公式带有特性系数的随机项^[17],避免过早出现局部最优的情况,但是它是以增加迭代次数为代价来提高算法精度。为了避免每次迭代的最优个体受到破坏或丢失,采用遗传算法中的精英保留策略对位置更新公式进行改进,通过强化当前种群中最优萤火虫个体对其他个体的牵引作用增强该种群对其他种群的影响程度,以保证每一代最优个体不会丢失,有效避免算法陷入局部最优,从而提高寻优精度。改进的位置更新公式为

$$x_{p,K+1} = x_{b,K} + \beta_{bp,K}(r_{bp,K})(x_{b,K} - x_{p,K}) + s_1(r_1 - 0.5)(x_{g,K} - x_{p,K}) \tag{14}$$

式中: s_1 为步长, $s_1 \in [0,1]$; r_1 为 $[0,1]$ 区间服从均匀分布的随机数; $x_{g,K}$ 为萤火虫种群个体第 K 次迭代所处的最优位置。

萤火虫个体位置更新中的基础参数 γ 、 β_0 和 r_1 的取值对求解过程具有一定的影响。较大的 γ 利于算法进行精细的局部搜索,而较小 γ 则利于算法进行全局搜索。较小 β_0 可以提高算法的鲁棒性,而较大的 β_0 则可能加速收敛但降低求解精度。 r_1 反映了算法寻优的随机性,适当的随机性可以帮助算法跳出局部最优解,但过多的随机性会导致算法无法收敛到最优解。此外, s_1 的选择对算法的收敛速度和寻优精度具有关键作用。若采用定步长,较大的步长会加快收敛速度,但降低了计算精度;较小的步长虽提高了计算精度,但会降低收敛速度。因此,本文采用自适应步长,即在算法寻优初期,步长取值较大,随着迭代次数的增加,步长取值会逐渐减小至极小值,这样可以防止萤火虫因步长过大错过最优值所处的位置而出现振荡现象。因此,第 K 次迭代时自适应步长为

$$s_K = s_{\max} e^{[\cos(2K/K_{\max}) - (1+4K/K_{\max})]} + s_{\min} \tag{15}$$

式中: $K_{\max}$ 为最大迭代次数; $s_{\max}$ 为最大步长; $s_{\min}$ 为最小步长。

c. 输出最优值。在位置更新后的萤火虫种群个体 x_b 中,利用式(1)~(3)重新计算这些个体所对应的目标函数值,比较它们之间的大小,找到最小的目标函数值及对应的萤火虫个体位置作为局部最优结果。然后,将本次迭代的局部最优与上一次迭代的局部最优进行比较,若前后两次目标函数值的差值小于精度要求,且迭代次数超过最大迭代次数 $K_{\max}$,则输出最终结果;否则,继续迭代,利用式(11)~(15)重新计算萤火虫个体间距离、相对荧光亮度和吸引度,并更新个体位置。

基于 IFA 的地区电网无功电压优化流程如图 1 所示。

3 算例验证

为了验证本文方法的有效性,采用改进 IEEE-30 节点系统进行仿真分析,并与 FA、改进遗传算法^[18]

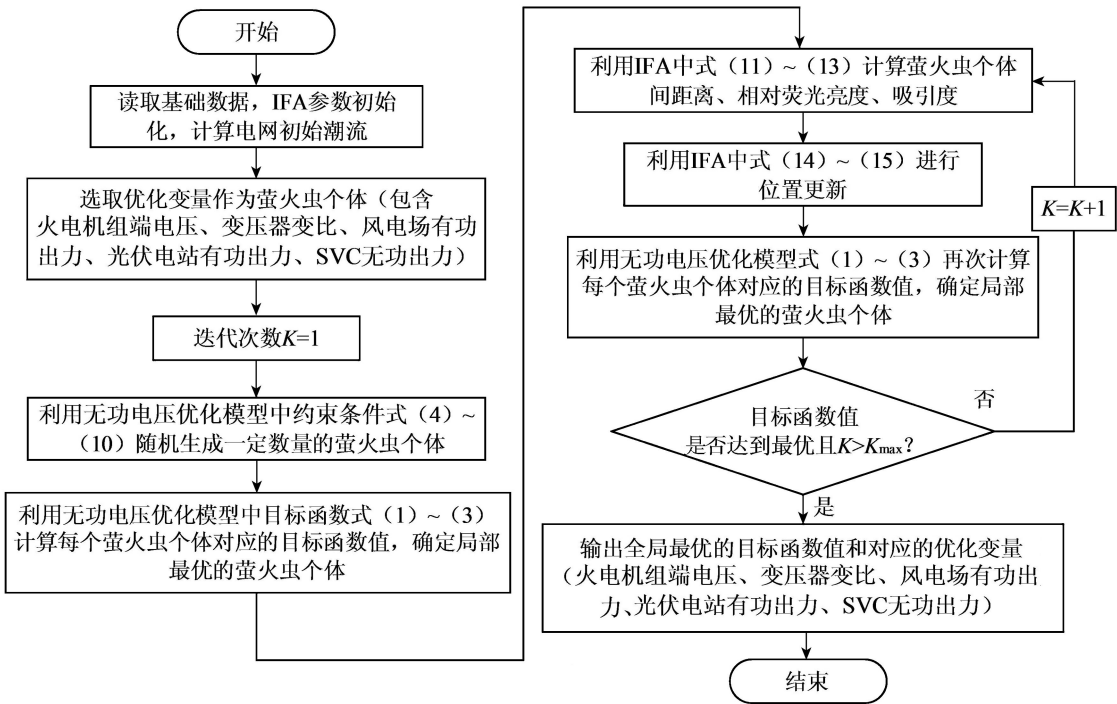


图 1 基于 IFA 的地区电网无功电压优化流程

Fig. 1 Flowchart of reactive power and voltage optimization based on IFA in regional power grids

(improved genetic algorithms, IGA)进行了对比。算例部分数据来自文献[19],包括 IEEE-30 节点系统的网络参数、负荷功率、火电机组的出力与端电压、变压器变比等,均为标么值形式。

3.1 基本数据与仿真参数

图 2 为改进 IEEE-30 节点系统接线图,其中含 6 个火电厂(G1~G6)、4 台变压器(T1~T4)、1 个平衡节点(G1)、5 个 PV 节点(G2~G6)、1 个光伏电站(GF1)和 2 个直驱式风电场(W1、W2)。节点 7、节点 10、节点 24 和节点 30 分别接入 SVC。

为了保证电力系统安全稳定运行,参考 IEEE 标准设置了状态变量和控制变量需满足的不等式约束上下限值(表 1)。

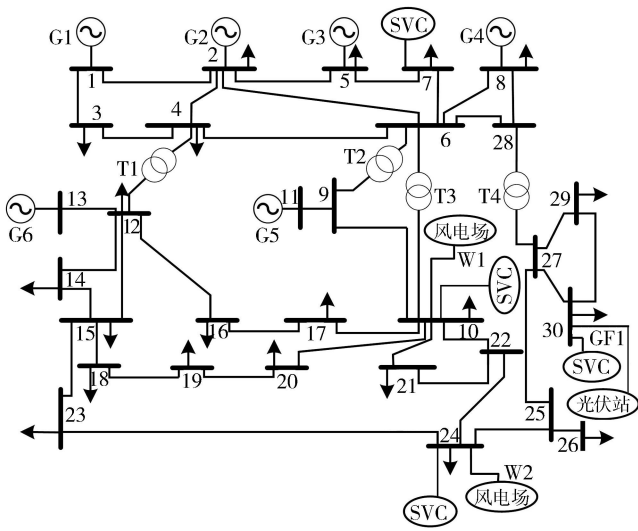


图 2 改进 IEEE-30 节点系统

Fig. 2 Improved IEEE-30 bus system

表 1 状态变量和控制变量的上下限值

Table 1 Upper and lower limits for state variables and control variables

变量	所在位置	上限值	下限值
节点电压幅值	节点 1~30	1.05	0.95
变压器变比	T1~T4	1.10	0.90
1 号 SVC 无功出力	节点 7	0.50	0.00
2 号 SVC 无功出力	节点 10	0.50	0.00
3 号 SVC 无功出力	节点 24	0.10	0.00
4 号 SVC 无功出力	节点 30	0.20	0.00
火电机组无功出力	节点 2、5、8、11、13	0.40	-0.10
1 号风电场有功出力	节点 10	0.30	0.00
2 号风电场有功出力	节点 24	0.40	0.00
光伏电站有功出力	节点 30	0.20	0.00

注:表中数值均为标么值。下同。

3.2 性能对比

算法 IFA、FA 和 IGA 均随机运行 15 组,其收敛精度、最大迭代次数和种群数均设为 10^{-6} 、200 次和

50 个。IFA 和 FA 共有的参数分别设置: $\beta_0=0.6,\gamma=0.8,d=17,w=0.6$ 。IFA 特有的参数设置: $s_{\max}=50,s_{\min}=0.1$ 。IGA 中变异概率取为 0.6,交叉率取为 0.8。

由表 2 可知,3 种优化算法在随机运行 15 组后,无论最优组还是最差组结果,有功网损均比初始值(优化前)的 0.0801 有所降低,但是 IFA 最小,IGA 次之,FA 最大;3 种优化算法的无功偏差、电压偏差均比初始值大大降低,且 IFA 最小,FA 次之,IGA 最大。由此说明,IFA 在 3 个指标上均具有最优计算精度。

图 3 为 3 种优化算法在最优运行情况下目标函数值随迭代次数变化。由图 3 可知,IFA 在第 1 次迭代后的目标函数值都比 IGA、FA 的低,在第 8 次迭代后收敛至最优值 0.301,说明 IFA 在混沌初始化时,初始种群在搜索空间中分布更加均匀,使得寻优精度更高,全局搜索能力更强;而 IGA 在第 2 次迭代后陷入局部最优,在第 73 次迭代后才达到最优值 0.4267;FA 在第 3 次迭代后短时陷入局部最优,在第 9 次迭代后才达到最优值 0.308。由此说明,IFA 优于其他两种算法,寻优过程中收敛速度快,避免陷入局部最优。

表 2 3 种优化算法的指标计算结果
Table 2 Calculation results of indicators using three optimization algorithms

优化算法	有功网损		无功偏差		电压偏差	
	最优组	最差组	最优组	最差组	最优组	最差组
IGA	0.0563	0.0616	0.0133	0.0235	0.5930	0.7000
FA	0.0629	0.0630	0.0133	0.0213	0.3930	0.3990
IFA	0.0522	0.0569	0.0132	0.0212	0.3920	0.4110

注:有功网损、无功偏差、电压偏差的初始值分别为 0.0801、0.1072、0.7120。

3.3 优化结果对比

为进一步说明 IFA 的有效性,表 3 给出了 3 种优化算法在最优运行结果下改进 IEEE-30 系统的节点电压对比,表 4 列出各项控制变量的数据对比。

表 3 3 种优化算法下改进 IEEE-30 节点系统电压对比

Table 3 Voltage comparison of improved IEEE-30 bus system among three algorithms

节点编号	电压				节点编号	电压			
	初始值	IGA	FA	IFA		初始值	IGA	FA	IFA
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	16	0.9700	1.0140	1.0150	0.9993
2	0.9868	1.0300	1.0110	1.0160	17	0.9684	1.0120	1.0200	1.0170
3	0.9840	1.0170	1.0070	1.0000	18	0.9750	0.9993	0.9930	0.9795
4	0.9792	1.0090	1.0030	0.9976	19	0.9739	0.9977	0.9930	0.9824
5	0.9801	0.9967	0.9516	0.9937	20	0.9883	1.0020	0.9986	0.9900
6	0.9450	0.9985	0.9880	0.9958	21	0.9931	1.0240	1.0050	1.0020
7	0.9515	0.9962	0.9790	1.0020	22	0.9936	1.0230	1.0050	1.0020
8	0.9765	0.9833	0.9801	0.9948	23	0.9845	1.0060	0.9890	0.9768
9	1.0102	1.0010	1.0110	1.0090	24	0.9624	1.0130	0.9855	0.9839
10	0.9601	1.0200	1.0190	1.0170	25	0.9830	1.0100	1.0040	1.0100
11	1.0417	0.9700	1.0090	0.9958	26	0.9664	0.9921	0.9860	0.9921
12	1.0084	1.0220	1.0160	0.9896	27	0.9916	1.0170	1.0240	1.0350
13	1.0388	1.0500	1.0310	0.9766	28	0.9714	0.9970	0.9835	0.9938
14	0.9954	1.0090	1.0030	0.9792	29	0.9729	1.0190	1.0180	1.0370
15	0.9721	1.0008	0.9985	0.9785	30	0.9622	1.0320	1.0230	1.0500

由表 3 可知,系统初始状态下节点 6 的电压低于下限值 0.95,且各节点电压波动较大,平均电压偏差为 0.02363,电能质量较差;通过采用 3 种优化算法对火电机组端电压、变压器变比、SVC 无功出力 and 新能源场站有功出力等优化变量进行调节后,节点 6 的电压均得到改善,IGA、FA 和 IFA 的平均电压偏差分别为 0.01357、0.01327 和 0.01325,可见 IFA 的各节点电压波动最小,均运行在合理范围内。另外,节点 10、24 接入风电场,节点 30 接入光伏电站,因这些节点受到新能源的随机波动或无功不足等原因导致原始电压接近下限,3 种算法优化后,利用本地 SVC 装置无功调节使其电压均得以提升,但是 IFA 的整体优化效果最佳。综上,IFA 适用于加入了风能、光伏等新能源的电力系统,能有效抑制新能源场站并网时的电压波动,显著提

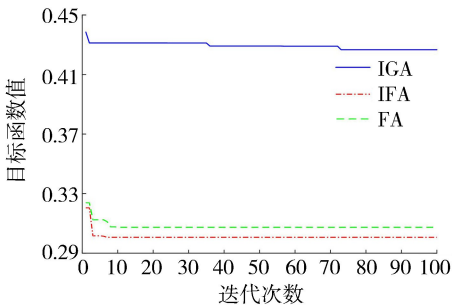


图 3 3 种优化算法下目标函数值
Fig.3 Comparison of objective function values among three algorithms

高地区电网电能质量。

由表 4 可知,IFA 能使新能源场站输送的有功功率接近于满发状态,充分发挥了新能源场站的效能,同时,通过合理分配 SVC 装置的无功出力,降低了有功网损,改善了地区电网的无功分布和电压质量,有效提高了系统整体性能。

表 4 3 种优化算法下各控制变量
Table 4 Comparison of control variables among three algorithms

优化变量	初始值	优化值			优化变量	初始值	优化值		
		IGA	FA	IFA			IGA	FA	IFA
V_{g1}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	T_4	0.958 1	0.950 0	1.000 0	0.900 0
V_{g2}	0.986 8	1.016 7	1.011 0	1.016 0	Q_{c7}	0.300 0	0.200 0	0.300 0	0.500 0
V_{g3}	0.980 1	0.983 3	0.951 6	0.993 7	Q_{c10}	0.090 0	0.133 3	0.400 0	0.347 4
V_{g4}	0.976 5	1.036 7	0.980 1	0.994 8	Q_{c24}	0.040 0	0.073 3	0.089 1	0.100 0
V_{g5}	1.041 7	0.983 3	1.009 0	0.994 8	Q_{c30}	0.070 0	0.013 3	0.190 0	0.200 0
V_{g6}	1.038 8	0.996 7	1.031 0	0.975 6	P_{W1}	0.200 0	0.270 0	0.299 9	0.300 0
T_1	1.015 5	1.000 0	0.975 0	1.025 0	P_{W2}	0.320 0	0.400 0	0.400 0	0.400 0
T_2	0.962 9	1.000 0	1.075 0	1.100 0	P_{GFI}	0.100 0	0.200 0	0.199 9	0.200 0
T_3	1.012 9	1.025 0	1.025 0	1.100 0					

注: V_{g1} 、 V_{g2} 、 V_{g3} 、 V_{g4} 、 V_{g5} 和 V_{g6} 分别为6个火电厂机组的端电压; T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 分别为4台变压器的变比; Q_{c7} 、 Q_{c10} 、 Q_{c24} 和 Q_{c30} 分别为4处SVC的无功出力; P_{W1} 和 P_{W2} 分别为两处风电场的有功出力; P_{GFI} 为光伏电站的有功出力。

4 结 语

针对风电、光伏等新能源场站大规模并网带来的电压波动及越限问题,以及考虑到节点电压波动和火电机组无功出力对有功网损的影响,提出了含多种新能源的地区电网无功电压优化模型,通过修正位置更新公式和引入自适应步长提出了改进萤火虫算法 IFA,并利用该算法对优化模型进行求解。算例计算结果表明,本文优化模型可降低系统有功网损,改善地区电网无功分布,同时抵制了系统电压波动,提高了地区电网电能质量;IFA 能有效提高计算精度和计算速度,提升全局寻优能力。

参考文献:

[1] 周文俊,曹毅,李杰,等.考虑风电场调控裕度的风火打捆直流外送系统无功电压紧急控制策略[J].中国电力,2023,56(4):77-87. (ZHOU Wenjun, CAO Yi, LI Jie, et al. Reactive voltage emergency control strategy of wind-thermal-bundled DC transmission system considering wind farm regulation margin[J]. Electric Power, 2023, 56(4):77-87. (in Chinese))

[2] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等.深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 p - y 曲线适用性研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (BAO Jinhu, SU Jingbo, WU Feng, et al. Field horizontal loading test and p - y curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):127-134. (in Chinese))

[3] 王渝红,廖逸彝,宋雨妍,等.风电场内部分散式无功电压优化控制策略[J].高电压技术,2022,48(12):5047-5056. (WANG Yuhong, LIAO Yiben, SONG Yuyan, et al. Distributed optimal control strategy of reactive power and voltage in wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12):5047-5056. (in Chinese))

[4] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5):1741-1750. (KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5):1741-1750. (in Chinese))

[5] 尹丽君,许昌,黄显峰,等.水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):65-69. (YIN Lijun, XU Chang, HUANG Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):65-69. (in Chinese))

[6] 李继清,龙健,刘洋.基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-10. (LI Jiqing, LONG Jian, LIU Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1):1-10. (in Chinese))

[7] 高波,彭程,路文梅,等.基于改进粒子群算法的电网系统无功电压控制[J].计算机仿真,2022,39(9):86-90. (GAO Bo,

PENG Cheng, LU Wenmei, et al. Reactive power and voltage control of power grid system based on improved particle swarm algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 86-90. (in Chinese))

[8] QIAO Feng, MA Jin. Voltage/var control for hybrid distribution networks using decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12015-12025.

[9] 黄大为, 王孝泉, 于娜, 等. 计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4377-4389. (HUANG Dawei, WANG Xiaoquan, YU Na, et al. Hybrid timescale voltage/var control in distribution network considering PV power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4377-4389. (in Chinese))

[10] XU Ruipeng, ZHANG Cuo, XU Yan, et al. Multi-objective hierarchically-coordinated volt/var control for active distribution networks with droop-controlled PV inverters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 998-1011.

[11] 王耀翔, 戴朝波, 杨志昌, 等. 考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 83-90. (WANG Yaoxiang, DAI Chaobo, YANG Zhichang, et al. Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 83-90. (in Chinese))

[12] 任鑫, 王华, 王忠超, 等. 基于聚类分区的风电场无功电压优化控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15154-15162. (REN Xin, WANG Hua, WANG Zhongchao, et al. Optimal control strategy for reactive power and voltage of wind farms based on clustering features[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 15154-15162. (in Chinese))

[13] 吴忠强, 赵立儒. 基于萤火虫算法的主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 149-154. (WU Zhongqiang, ZHAO Liru. Optimal dispatch of active distribution network based on firefly algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 149-154. (in Chinese))

[14] 马庆, 邓长虹. 基于单/多智能体简化强化学习的电力系统无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1300-1312. (MA Qing, DENG Changhong. Single/multi agent simplified deep reinforcement learning based volt-var control of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1300-1312. (in Chinese))

[15] PECENAK Z K, HAGHI H V, LI Changfu, et al. Aggregation of voltage-controlled devices during distribution network reduction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 33-42.

[16] 粟世玮, 张谦, 熊炜, 等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 100-110. (SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 100-110. (in Chinese))

[17] 张永良. 基于改进萤火虫算法的含分布式电源配电网多目标无功优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[18] 冷博文. 基于遗传算法的电力系统网损最小无功优化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

[19] SHAHIDEHPOUR M, WANG Y. Appendix C: IEEE-30 bus system data[C]//SHAHIDEHPOUR M, WANG Y. Communication and Control in Electric Power Systems. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2003.

(收稿日期: 2024 - 02 - 29 编辑: 刘晓艳)