

基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究

刘科研¹, 盛万兴¹, 马晓晨², 李运华², 董伟杰¹, 杨丽曼²

(1. 中国电力科学研究院配电研究所, 北京 100192; 2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对分布式光伏接入配网系统的优化规划问题, 提出一种兼顾经济性和安全性的光伏并网规划方法。以接入容量最大、投资运行维护成本最低、网络有功损耗最小为经济性规划目标, 以电压偏差、电压波动、谐波指标为规划约束, 建立光伏并网的多目标约束优化模型。采用多种群遗传算法求解规划模型。利用控制参量不同的多个种群协同进行优化搜索, 同时在单个种群的操作中引入适应度函数标定和自适应算法, 克服算法求解多目标约束优化模型未成熟收敛的缺陷。结合 IEEE33 节点配电系统进行求解分析, 验证所提出模型和方法的有效性, 并对不同负荷、接入方案、功率因数下的规划方案进行对比研究, 归纳不同因素对规划结果的一般性影响规律。

关键词: 分布式光伏发电; 电能质量; 约束优化; 有源配电网; 多种群遗传算法

中图分类号: TM715

文献标志码: A

0 引言

光伏发电作为太阳能的有效利用方式之一, 具有灵活环保的特点, 分布式光伏发电并网作为光伏发电的利用方式之一, 通常接入低压配电网。但光伏的接入会改变配网的拓扑结构和潮流分布, 同时光伏输出特性受环境影响具有波动性, 并网后会影响配网的电能质量、继电保护、电网调度等^[1-3]。故研究光伏并网的优化规划对系统稳定运行具有重要意义。

目前, 国内外学者对分布式电源(distributed generators, DG)接入配网的优化规划问题进行了大量的研究。考虑 DG 接入对配网的某一因素影响, 建立单目标优化模型进行优化规划, 例如考虑电压偏差^[4]、谐波^[5]、三段式电流保护策略^[6], 这类研究着重探讨单一因素影响下的优化方法, 对其他指标约束的模型并不具备普适性。为提高优化规划的有效性, 进行 DG 规划应综合考虑多种相关因素, 如文献[7]提出以电压偏差、电压波动及短路容量约束的 DG 规划模型并进行研究; 文献[8]讨论以电压偏差、谐波、三相不平衡度为约束的 DG 优化规划, 这类研究从安全运行的角度, 综合多因素约束得到优化结论。同时为尽可能提高 DG 接入后整体配网系统的经济性, 许多学者也将经济性指标纳入 DG 规划中进行考虑, 如文献[9]建立考虑投资、运行、效益的规划模型, 对经济最优规划进行研究; 文献[10]讨论了考虑成本、收益、边际收益

的利润最大化规划模型, 并利用模糊数来解决 DG 选址定容的问题。这类模型侧重于对经济性目标的寻优, 对电能质量的约束仅考虑基本的指标, 模型约束有待完善。而针对 DG 并网约束优化问题的求解, 求解方法包括传统方法和智能算法。但由于 DG 的优化规划是一个多目标约束的非线性问题, 形式复杂规模较大, 同时约束条件使得决策变量可行搜索空间不规则, 基于梯度的传统算法难以有效寻优。故相关研究多采用智能算法, 如遗传算法^[7,9]、粒子群算法^[11]、人工鱼群算法^[12]等, 但这些算法均存在未成熟收敛的缺陷。遗传算法的优化性能受遗传算子的影响, 算子设置不当易陷入局部最优解; 粒子群算法缺乏速度的动态调节也易陷入局部最优, 如何提高求解的有效性也是优化规划问题的关键之一。

针对 DG 中的分布式光伏并网优化规划, 本文提出一种综合考虑电能质量约束和经济性规划目标的光伏并网优化规划方法。首先, 理论分析光伏并网对配网电能质量的影响; 其次, 建立考虑配网安全性和经济性的优化规划模型, 以电能质量为约束保证配网安全运行, 以经济指标为优化目标提升配网经济性; 然后利用多种群遗传算法求解模型, 通过多种群协同进化并结合自适应算法的方式克服未成熟收敛的缺陷; 最后通过算例分析验证算法的收敛性和有效性, 并分析负荷大小、接入方式、功率因数对规划方案的影响。

收稿日期: 2019-04-09

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(GFJDKOOPJJS1600010)

通信作者: 刘科研(1978—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事电力系统及其控制方面的研究。liukeyan@126.com

1 光伏接入对配网电能质量的影响

受光伏自身结构及环境影响,光伏发电并网会影响配网的电能质量。随着光伏并网渗透率的提高,接入容量过大易造成电压越限的问题;同时光伏自身输出受环境影响呈现波动性,易造成配网的电压波动问题;通过光伏逆变器进行并网的方式会向配网中注入大量谐波,易造成配网的谐波污染问题;而由于目前并网方式多为三相逆变并网,单相光伏发电并网还未大规模应用,故对电网三相电压不平衡度的影响较小;配网系统的短路容量远大于并网的DG容量,且短路故障时规定光伏应迅速退出,故光伏对配网短路容量影响较小。综上,电压偏差、电压波动、谐波是光伏并网后配网最易越限的电能质量指标,本文针对光伏接入对这3个指标产生的影响进行分析。

1.1 分布式光伏接入对配网电压质量的影响

由于配电网拓扑多数为闭环设计开环运行,故以图1放射状配电馈线为例,分析光伏接入对配网节点电压的影响,假定光伏功率因数为1。图中, n 为馈线上节点数; U_i 为节点 i 的电压, kV; i 代表任意节点; R_i, X_i 为支路 i 的等效电阻和电抗, Ω ; P_i, Q_i 为节点 i 处的有功、无功负荷, kW, k var; P_{pv} 为光伏接入功率, kW。

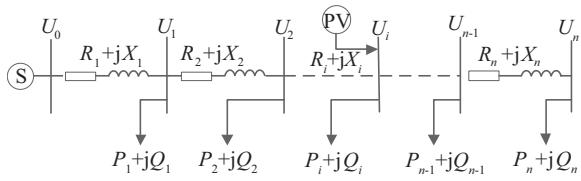


图1 放射状配电馈线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radial distribution feeder

未接入光伏前,馈线上相邻2个节点之间的电压差和任意 i 节点的电压可表示为:

$$\Delta U_i = U_i - U_{i-1} = -\frac{R_i \sum_{m=i}^n P_m + X_i \sum_{m=i}^n Q_m}{U_{i-1}} \quad (1)$$

$$U_i = U_0 + \sum_{k=1}^i \Delta U_k = U_0 - \sum_{k=1}^i \frac{R_k \sum_{m=k}^n P_m + X_k \sum_{m=k}^n Q_m}{U_{k-1}} \quad (2)$$

光伏接入节点 t 后,接入点上游任意2个点间电压差和上游任意节点 i ($0 < i < t$) 电压分别表示为:

$$\Delta U'_i = U'_i - U'_{i-1} = -\frac{R_i \left(\sum_{m=i}^n P_m - P_{pv} \right) + X_i \sum_{m=i}^n Q_m}{U'_{i-1}} \quad (3)$$

$$U'_i = U'_0 - \sum_{k=1}^i \frac{R_k \times \left(\sum_{m=k}^n P_m - P_{pv} \right) + X_k \sum_{m=k}^n Q_m}{U'_{k-1}} \quad (4)$$

光伏接入节点 t 后,接入点下游相邻2个点电压差和下游任意节点 i ($0 < t < i$) 电压可分别表示为:

$$\Delta U'_i = U'_i - U'_{i-1} = -\frac{R_i \sum_{m=i}^n P_m + X_i \sum_{m=i}^n Q_m}{U'_{i-1}} \quad (5)$$

$$U'_i = U'_0 - \sum_{k=1}^t \frac{\left(\sum_{m=k}^n P_m - P_{pv} \right) \times R_k + X_k \sum_{m=k}^n Q_m}{U'_{k-1}} - \sum_{k=t+1}^i \frac{R_k \sum_{m=k}^n P_m + X_k \sum_{m=k}^n Q_m}{U'_{k-1}} \quad (6)$$

对比式(2)、式(4)和式(6),判断光伏接入对各节点大小的影响。接入瞬间各节点电压不能突变,可近似认为各节点电压不变,即 $U_{k-1} = U'_{k-1}$,馈线首端变电站电压 U_0 认为是定值,光伏注入点及周围各节点就地消纳光伏注入的功率,导致馈线上的有功负荷变小,故可判断各节点电压 U'_i 会增大;然后分析变化过程, U_0 不变, U'_{k-1} 变大,求和项 $\sum \Delta U$ 中的分子项有功负荷 $\sum P_m - P_{pv}$ 变小,则各节点电压 U'_i 仍增大。故可判断达到稳态后,各节点 U'_i 的值一定大于 U_i ,即光伏接入会抬升馈线上各节点电压;式(1)表明未接入光伏时电压沿馈线方向降低;考虑生活用电功率因数高可近似忽略无功负荷,则由式(3)可知,当 $\sum_{i=p}^n P_k > P_{pv}$ 时,接入点前节点电压沿馈线降低,反之当 $\sum_{i=p}^n P_k < P_{pv}$ 时,接入点前节点电压沿馈线升高,接入点电压最大;由式(5)可知接入点之后电压仍为沿馈线降低。故式(1)、式(3)和式(5)表明,光伏接入会改变馈线上的电压分布情况。

1.2 分布式光伏接入对配网电压波动的影响

由式(4)可推导光伏接入点的节点电压为:

$$U'_i = U'_0 - \sum_{k=1}^i \frac{\left(\sum_{m=k}^n P_m - P_{pv} \right) \times R_k + X_k \sum_{m=k}^n Q_m}{U'_{k-1}} \quad (7)$$

可知光伏接入点的电压受光伏接入容量的影响,故光伏受环境因素变化影响而输出的波动性功率会造成配网节点电压的波动,且光伏输出功率波动越大电网电压波动越剧烈。伴随光伏并网渗透率的提高,电压波动的影响也在被逐渐放大。

1.3 分布式光伏接入对配网谐波的影响

分布式光伏的升压及逆变环节由于使用了晶闸管等非线性电力电子元件,其高频的通断产生的脉动电流含有比例很高的谐波成分,其注入叠加在电网电流上会使电网电流发生畸变,故分布式光伏接入的容量越大,其注入的各次谐波电流值也越大,对电网造成的谐波影响也越严重。

以图1所示放射状配电馈线为例分析光伏接入位置对配网谐波的影响,以光伏接入馈线末端即接入 n 节点处为例进行分析。通常考虑变电站及以上系统为无穷大系统,而且变电站利用滤波装置能够极大的抑制谐波,所以可将变电站母线看做各次谐波电压的零电势点,所以馈线上任意点的各次谐波电压值大致可表示为:

$$V_p^k = I_{pv}^k \times Z_{p0}^k \quad (8)$$

式中: V_p^k —— p 节点处的 k 次谐波电压值, kV; I_{pv}^k —— 光伏注入的 k 次谐波电流, A; Z_{p0}^k —— 节点 p 到变电站的谐波阻抗, Ω 。故从光伏接入点到变电站, 各节点各次谐波电压逐渐降低, 假定线路参数一致, 则可认为各节点谐波电压按线路比例降低, 故任一节点谐波电压可表达为:

$$V_p^k = \frac{l_{n0} - l_{np}}{l_{n0}} V_n^k \quad (9)$$

式中: l_{n0}, l_{np} —— 接入点到变电站和节点 p 的距离, km; V_n^k —— 接入点的各次谐波电压, kV。则 p 节点处的电压总谐波畸变率为:

$$\begin{aligned} THD_{Up} &= \frac{\sqrt{\sum_2^{20}(U_p^k)^2}}{U_p^1} = \frac{l_{n0} - l_{np}}{l_{n0}} \times \frac{U_n^1}{U_p^1} \times \sqrt{\sum_2^{20}(U_n^k)^2} \\ &= \frac{l_{n0} - l_{np}}{l_{n0}} \times \frac{U_n^1}{U_p^1} \times THD_{Un} \end{aligned} \quad (10)$$

当光伏接入不改变基波电压沿馈线方向降低的电压分布时, 即 $U_p^1 > U_n^1$, 则 $THD_{Up} < THD_{Un}$ 。当光伏接入改变基波电压分布规律, 即 $U_p^1 < U_n^1$, 由电压偏差应在 $\pm 5\%$ 的约束有 $(U_n^1/U_p^1)_{\max} = 1.05/0.95$, 可推导得: 当 $l_{n0}/l_{np} < 10.5$

时, $THD_{Up} < THD_{Un}$ 。

综上, 当 $l_{n0}/l_{np} < 10.5$, $THD_{Up} < THD_{Un}$, 即从变电站向光伏接入方向, 各节点电压总谐波畸变率逐渐变大, 接入点的电压总谐波畸变率最大。则在一定误差范围内可近似得出结论, PV 接入馈线末端造成的电压畸变率最大, 谐波影响最严重。

2 分布式光伏接入规划模型

本文以易越限的电压偏差、谐波、电压波动指标为技术性约束, 以接入容量最大、投资运行维护成本最低、网络有功损耗最小为经济性规划目标, 建立兼顾配网安全性和经济性的光伏并网优化规划模型。使用牛顿拉夫逊法解算潮流, 并利用多种群遗传算法进行寻优, 以多种群协同进化并结合自适应算法的方式提高算法优化性能, 避免陷入局部最优解。

2.1 目标函数

本文研究多个光伏系统的接入规划, 以多个光伏系统并网的容量之和最大为子目标 1。

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^N S_{pvi} \quad (11)$$

式中: F —— 并网总容量函数; S_{pvi} —— 第 i 个光伏的接入容量, kVA; N —— 光伏的装机并网数量。

为提高配网经济性, 以分布式光伏的投资运行维护成本最小为子目标 2。

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N K_{pv} S_{pvi} \quad (12)$$

$$Y_2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} T_{pv} \right] S_{pvi} \quad (13)$$

$$Y_3 = \gamma \sum_{i=1}^N E_i \quad (14)$$

式中: Y_1 —— 投资费用, 万元; K_{pv} —— 单位容量投资费用, 万元/kVA; Y_2 —— 运行维护费用, 万元; t —— 光伏使用寿命, a; r —— 贴现率; T_{pv} —— 单位容量运行维护成本, 万元/kVA; Y_3 —— 环境效益, 万元; E_i —— 第 i 台光伏的年发电量, kW·h; γ —— 发电效益, 万元/kWh。则投资运行维护成本最小的子目标函数为:

$$\min F_2 = Y_1 + Y_2 - Y_3 \quad (15)$$

式中: F_2 —— 投资运行维护成本函数。

为提高配网经济性, 以分布式光伏接入后配网网络有功损耗最小为子目标 3。

$$\min F_3 = \sum_{h=1}^M G_{h,ij} (U_{h,i}^2 + U_{h,j}^2 - 2U_{h,i}U_{h,j} \cos \delta_{ij}) \quad (16)$$

式中: F_3 —— 有功网损函数; $G_{h,ij}$ —— h 支路电导, S; M —— 支路数; $U_{h,i}, U_{h,j}$ —— 节点电压, kV; δ_{ij} —— 两侧电压相位差, rad; i, j —— 支路两侧节点标号。

利用线性加权组合法将 3 个目标函数通过权重组合成经济性优化目标函数。

$$\max F = \omega_1 F_1 - \omega_2 F_2 - \omega_3 F_3 \quad (17)$$

式中: F —— 经济性目标函数; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ —— 3 个子目标函数的权重。

2.2 约束条件

2.2.1 电压偏差约束

根据《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325—2008)^[13]规定, 不同电压等级的线路允许的电压偏差限值不同, 以电压偏差限值为电压约束。

$$U_N(1-\varepsilon) \leq U_i \leq U_N(1+\varepsilon) \quad (18)$$

式中: U_N —— 标称电压, kV; ε —— 具体电压等级的电压偏差率限值。

2.2.2 电压波动约束

根据《电能质量-电压波动和闪变》(GB/T 12326—2008)^[14]规定, 不同电压等级和电压变动频度的系统所允许的电压波动限值不同, 电压波动确定的约束条件为:

$$d_k \leq d_{\max} \quad (19)$$

式中: d_k —— 由光伏系统引起系统电压波动值; d_{\max} —— 国标规定的最大电压波动值。

《电能质量-电压波动和闪变》中给出了电压波动的估算方法, 当已知三相负荷的有功功率和无功功率的变化量 ΔP 、 ΔQ , 可用式(20)进行估算。

$$d = \frac{R_L \Delta P + X_L \Delta Q}{U_N^2} \times 100\% \quad (20)$$

式中: R_L 、 X_L ——负荷处的线路电阻和电抗, Ω ; ΔP ——负荷有功变化量, kW ; ΔQ ——负荷有功和无功变化量, $kW, kvar$ 。

本文考虑负荷为恒功率负荷, 则三相负荷有功功率和无功功率的变化量即为接入的分布式光伏的有功无功变化量, 文献[7, 15]提到当环境因素变化时, 光伏输出功率的变化幅度一般不超过其最大输出功率的一半, 同时由于分布式光伏输出具有较高的功率因数, 在忽略光伏无功出力情况下 k 节点处由光伏引起的电压波动值为:

$$d_{pv,k} = \frac{R_k \times \lambda_p P_{pv,k}}{U_N^2} \quad (21)$$

式中: λ_p ——光伏系统在环境因素影响下的输出功率瞬间最大变化幅度与额定输出功率的比值, 取值 0.5; $P_{pv,k}$ ——光伏最大输出功率, kW 。

2.2.3 谐波约束

根据《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)^[16]规定, 不同电压等级的系统对接入点注入的各次谐波电流允许值有明确限值, 同时对于奇次谐波电压含有率、偶次谐波电压含有率及电压总谐波畸变率也都规定了允许达到的临界值。本文选择 2~19 次谐波进行研究。

研究谐波电流对光伏接入的约束, 根据国标^[16]规定, 电压等级不同、基准短路容量不同的系统规定允许注入的各次谐波电流最大值; 根据《光伏系统并网技术要求》(GB/T 19939—2005^[17]), 规定光伏并网发电系统允许输出的最大电流谐波含有率。为保证谐波电流约束条件的有效性, 取光伏在最大谐波输出情况下的注入电流来确定其极限准入容量, 则由谐波电流确定的约束条件为:

$$\frac{S_{pv}}{\sqrt{3} U_N} \times \mu_k \leq I_k \quad (22)$$

式中: S_{pv} ——光伏接入容量, kVA ; U_N ——标称电压, kV ; μ_k ——国标^[17]中规定的光伏系统输出的各次谐波含有率限值; I_k ——国标^[16]中规定的允许接入电网的各次谐波电流, A ; 下标: k 为谐波次数。

研究谐波电压含有率和电压总谐波畸变率对光伏接入的约束, 根据国标^[16], 规定不同电压等级系统允许的各次谐波电压含有率和电压总谐波畸变率。为保证谐波电压含有率约束条件的有效性, 取光伏系统在最大谐波输出情况下的注入电流来确定其准入容量。

$$I_k = \frac{S_{pv}}{\sqrt{3} \times U_N} \times \mu_k \quad (23)$$

$$HRU_k = \frac{\sqrt{3} U_N k I_k}{10 S_k} \quad (24)$$

$$U_k = HRU_k \times U_N \quad (25)$$

$$THD_u = \sqrt{\sum_2^{19} U_k^2} / U_1 \quad (26)$$

式中: I_k ——光伏注入的各次谐波电流, A ; HRU_k ——各次谐波电压含有率; S_k ——短路容量, kVA ; U_k ——各次谐波电压, kV ; THD_u ——谐波电压总畸变率。由奇、偶次谐波电压含有率和电压总谐波畸变率确定的约束条件为:

$$\begin{cases} HRU_k \leq 0.032, & k = 2n+1, n=1,2,3,\dots \\ HRU_k \leq 0.016, & k = 2n, n=1,2,3,\dots \end{cases} \quad (27)$$

$$THD_u \leq 0.04 \quad (28)$$

谐波电流、奇次和偶次谐波电压含有率、电压总谐波畸变率各自确定约束条件都可转换为关于光伏容量 S_{pv} 的不等约束, 合并其约束条件即为最终谐波指标确定的光伏容量 S_{pv} 不等约束条件。

2.2.4 线路热约束

为防止线路的载流量过大, 出现线路过载的现象, 对线路载流量进行约束为:

$$|I_k| \leq I_{k,max} \quad (29)$$

式中: I_k ——线路 k 上电流, A ; $I_{k,max}$ ——线路 k 允许输送的最大电流值, A 。

2.2.5 潮流等式约束

配网运行时潮流等式确认的等式约束为:

$$\begin{cases} P_{pv,k} - P_k - U_k \sum_{j=1}^n U_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}) = 0 \\ Q_{pv,k} - Q_k - U_k \sum_{j=1}^n U_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} - B_{kj} \sin \theta_{kj}) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $P_{pv,k}, Q_{pv,k}$ —— k 节点处所接光伏的有功无功出力, $kW, kvar$; P_k, Q_k —— k 节点有功无功负荷, $kW, kvar$; G_{kj}, B_{kj} ——节点导纳矩阵中的电导、电纳, S 。

2.3 规划模型

综合经济性规划目标和电能质量约束, 得到兼顾分布式光伏接入配网的经济性和安全性规划模型, 模型可简写为:

$$\begin{cases} \max F(S_{pv}, U, \delta, G) \\ \text{s.t. } h(S_{pv}, P, Q, U, I, \delta, G, P_s) = 0 \\ g(U, I) \leq 0 \\ m(S_{pv}) \leq 0 \end{cases} \quad (31)$$

式(31)中, 目标函数由光伏容量 S_{pv} , 电压 U 、相位 δ 、线路电导 G 确定, S_{pv} 通过潮流等式与有功无功负荷 P, Q 、系统电压 U 、电流 I 、相位 δ 、线路电导 G 、网损 P_s 建立联系, g 函数为电压 U 和电流 I 确定的电压偏差及线路热约束, m 函数为容量 S_{pv} 确定的电压波动及谐波约束。

2.4 基于多种群遗传算法的求解算法

2.4.1 多种群遗传算法

为克服标准遗传算法 (standard genetic algorithm, SGA) 求解多目标约束规划问题易陷入局部最优解的缺陷, 本文利用多种群遗传算法 (multiple population genetic algorithm, MPGA) 进行求解, 其结构如图 2 所示。

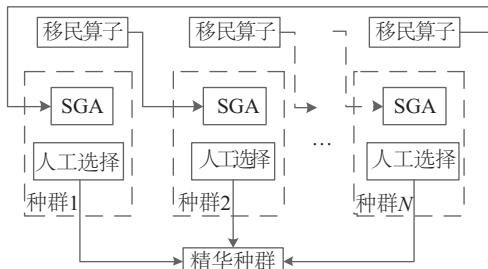


图2 MPG A 算法结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MPG A algorithm

多种群遗传算法通过多个控制参数不同的种群协同进化的方式克服未成熟收敛的缺陷,其中每一个种群使用自适应遗传算法进行寻优,同时不同种群在迭代一定代数后通过移民算子进行联系实现协同进化。不同种群使用不同的遗传算子,交叉、遗传概率较大的种群侧重于全局搜索,但局部搜索能力不足;交叉、遗传概率较小的种群侧重于局部搜索,但全局搜索能力不足,以多种群进行寻优实现不同的搜索目标,达到均衡全局搜索和局部搜索性能的目的。同时由于不同种群之间的遗传动作相互独立,在各种群引入自适应遗传算子,根据群体适应度进行调整遗传算子,对于适应度高于平均值的个体设定较小的交叉、变异概率使得本种群优秀个体得以保留,适应度低于平均值的个体设定为该种群设定的交叉、变异概率进行寻优,提高各群体向各自目标函数寻优的性能。通过多种群协同进化结合自适应算法的方式保证算法求解的有效性。

2.4.2 关键参数设定

1)适应度函数。对于选择动作,本文以线性加权组合的目标函数为适应度函数,由于本文潮流计算是标幺制下的牛顿拉夫逊算法,不同个体的适应度大小由标幺化的容量、网损及费用确定,不同个体之间差别较小,被选择的几率很接近,影响选择功能的有效性,故本文采用动态线性标定法对适应度函数进行标定,来提高选择动作的有效性, k 代个体适应度函数为:

$$F = f - f_{\min}^k + \xi^k \quad (32)$$

式中: F —— k 代个体适应度函数值; f —— k 代个体目标函数计算值; f_{\min}^k —— k 代个体中的最小目标函数值; ξ^k —— k 代压力调节值,随 k 的增加而减小,可采用式(33)所示的设置方法。

$$\begin{cases} \xi^0 = M \\ \xi^k = c \times \xi^{k-1}, c \in [0.9, 0.999] \end{cases} \quad (33)$$

式中: M —— 压力调节值初值,本文设定为 2; c —— 压力调节值的缩小系数,本文设定为 0.9。

2)交叉概率和变异概率。由于不同种群间相互独立,将各种群交叉和变异概率设定为跟随适应度函数变动而改动

的自适应交叉和变异概率。

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (34)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (35)$$

式中: P_c —— 自适应交叉概率; P_m —— 自适应变异概率; f_{\max} —— 每一代中群体中最大适应度值; f_{avg} —— 群体平均适应度值; f —— 要交叉 2 个个体中较大的适应度值; f' —— 变异个体的适应度值; k_1, k_3 —— 比例常数,本文设定 k_1 为 0.5, k_3 为 0.05; k_2, k_4 —— 该群体设定的交叉变异概率。

3)种群数量及种群中个体数量。对于种群数量大小,影响 MPG A 优化性能,对于种群中个体数量影响单个种群 SGA 的优化性能,种群数量及个体数量过小寻优性能差,过大影响效率,本文设定种群数量为 10,各种群中个体数为 100。

4)迭代精度。本文选择最优个体保持代数判据,即如果连续几个子代精英群体中的个体结果在一定误差内,则认为结果相同寻优结束,本文设定连续 5 代相同即判定寻优结束。

2.4.3 算法流程

根据 MPG A 算法原理及分布式光伏规划模型,建立 MPG A 算法流程如图 3 所示,具体步骤如下。

1)编码及初始化。由分布式光伏自身出力约束 $0 < S_{\text{pv}} < 6 \text{ MW}$ 和光伏容量离散精度 $\xi = 1 \text{ kW}$,确定光伏容量基因组二进制码长为:

$$L = \log_2 \left(\frac{6-0}{\xi} + 1 \right) = 13 \quad (36)$$

种群中每个个体含有 N 个分布式光伏,则每个个体基因型码长为 $13N$,种群个体数为 100,种群数量为 10,初始化利用随机函数生成 1000 个码长 $13N$ 的个体基因型。

2)潮流计算。对每个个体将其二进制基因型换算为十进制表现型,并标幺化按接入位置带入牛顿拉夫逊潮流计算程序,计算其在对应接入位置下的潮流分布、线路电流、节点电压等。

3)适应度计算。判断潮流计算的各节点电压、线路电流是否满足电压偏差、线路载流量约束,判断分布式光伏容量是否满足谐波、电压波动约束。如果某项约束条件不满足,则设定该个体的适应度为 $f(k)=0$,如果都满足,则按动态线性标定的适应度函数进行设定其适应度值,并按一定代数将 k 种群中适应度最优个体引入 $k+1$ 种群,最后将各种群中适应度非 0 的个体构成交配池。

4)选择交叉变异动作。对各个种群交配池中个体按适

应度大小形成轮盘，适应度越大个体被选择几率越大，用轮盘赌方式随机选择出父辈及母辈；按自适应交叉概率确定其交叉概率，并进行相应的交叉动作生成一个子代个体；对子代个体按自适应变异概率进行相应的变异动作生成新子代。重复上述步骤直至生成 100 个新子代。并将各种群中新子代最优个体引入精英种群。

5) 迭代结束。判断精英种群中新子代与上代最优个体是否在一定误差范围内保持相同，如果保持相同达 5 代则迭代结束输出最优个体表现型，否则转步骤 2)。

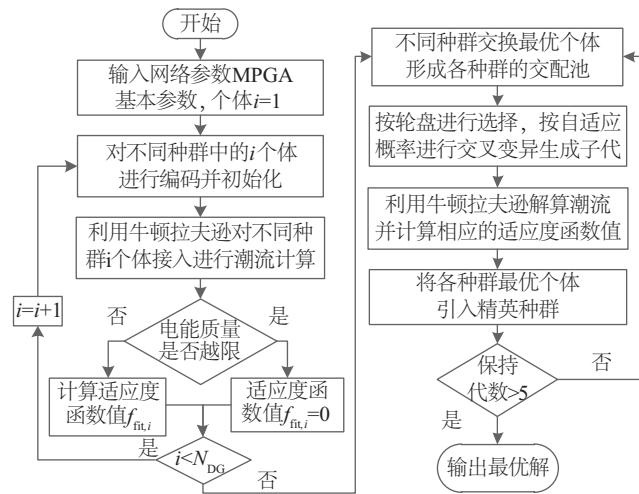


图3 MPG A 算法流程

Fig. 3 MPG A algorithm flow

3 算例求解与分析

3.1 算例介绍

本文选用文献[18]中 IEEE33 节点配电系统作为算例，规划分布式光伏的接入。系统结构如图 4，系统由 4 条馈线共 33 节点组成，虚线为系统联络线，系统电压等级为 10 kV，1 号节点表示变电站低压侧，设定为平衡节点，电压值为 1.05 pu，其他节点均为 PQ 节点，总有功负荷 3715 kW，总无功负荷 2300 kvar，线电压基准值 $U_B = 10 \text{ kV}$ ，三相功率基准值 $S_B = 10000 \text{ kVA}$ ，具体线路参数及负荷参数见文献[18]。

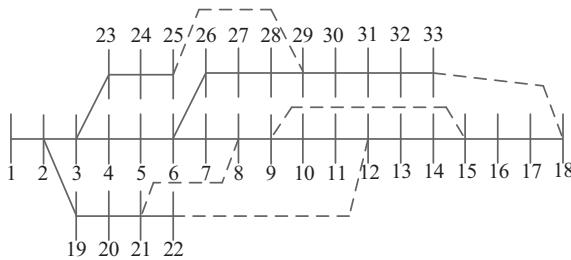
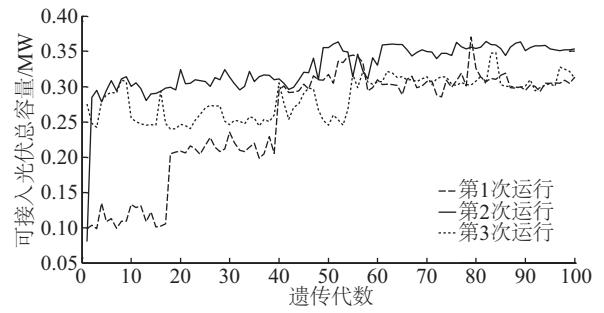


图4 IEEE 33 节点配电系统结构图

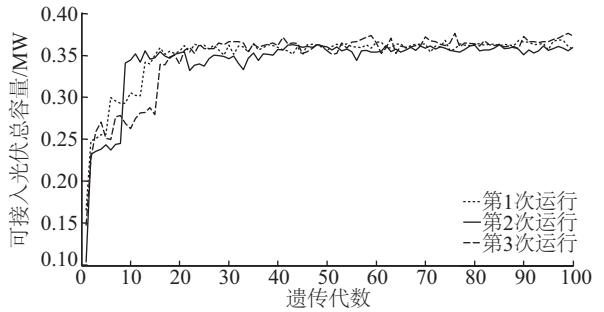
Fig. 4 Structure diagram of IEEE 33 nodes distribution system

3.2 算法收敛性及稳定性验证

为了验证多种群遗传算法相对于标准遗传算法解决多目标优化问题的优势，本文针对分布式光伏接入 12、14、16、18 节点的容量规划，分别用 2 种算法进行寻优求解，为对比寻优过程，此处使用遗传迭代数终止判据，迭代代数为 100 次，2 种算法解的寻优过程如图 5 所示。



a. SGA



b. MPG A

图5 遗传算法、多种群遗传算法迭代过程中解的寻优过程

Fig. 5 Optimization process of solutions in iterative process of SGA and MPG A

由图 5a 知，SGA 约在 60 代稳定在所寻最优解附近，但第 2 次运行结果均值较其余 2 次寻优结果均值大，说明其余 2 次寻优还有提高的空间，属于陷入局部最优解的未成熟收敛现象；从图 5b 可知，MPGA 约在 20 代稳定在寻优结果附近，且 3 次运行结果相当，经对比可发现 MPG A 较 SGA 具有更好的收敛性、稳定性和收敛速度。

3.3 模型有效性验证

为验证所建规划模型的有效性和优越性，针对光伏接入 5、8、11、14 节点的规划算例，用 MPG A 算法求解本文所提规划模型和文献[19-20]中研究分布式电源接入优化的规划模型，对比规划结果验证模型有效性。文献[19-20]中研究分布式电源接入优化的模型以接入容量最大为目标函数，以电压偏差不越限和潮流等式为约束条件。寻优的规划结果及配网运行参数对比见表 1。

表1 配网运行参数和规划结果对比

Table 1 Comparison of operation parameters of distribution network and planning results

模型	参数	节点5	节点8	节点11	节点14	和或最大值
多目标多约束模型	准入容量/kW	0.1360	0.0542	0.0037	0.1320	0.3259
	节点电压/pu	1.0582	1.0547	1.0532	1.0563	1.0582
	谐波电压总畸变率/%	1.1	0.44	0.03	1.07	1.1
	电压波动/%	0.56	0.28	0.01	0.39	0.56
	线路有功损耗/kW	92.65	线路无功损耗	70.28	线路损耗	116.28
单目标多约束模型	准入容量/kW	0.0270	0.2138	0.0458	0.0419	0.3285
	节点电压/pu	1.0530	1.0630	1.0562	1.0551	1.0630
	谐波电压总畸变率/%	0.22	1.73	0.37	0.34	1.73
	电压波动/%	0.11	1.1	0.09	0.12	1.1
	线路有功损耗/kW	100.82	线路无功损耗	76.81	线路损耗	126.75

对比分析2种规划模型所确定的优化结果和配网的运行参数,2种模型所求光伏总接入容量相当,分别为3259和3285kW;配网运行参数中,2种模型确定的电压波动最大分别为0.56%和1.1%,小于国标规定限值3%;最大谐波电压总畸变率分别为1.1%和1.73%,小于国标规定限值4%;最大电压偏差分别为1.0582和1.063pu,小于但接近国标规定限值1.07pu。说明在所用算例的网络参数和负荷大小情况下,电压偏差是配网安全性最先达到的限制约束,此时这2种模型均能保证光伏接入后配网的安全稳定运行;但在光伏接入容量相当的情况下,本文所提模型寻优结果各项指标较小,可获得更优的配网运行状态。且当网络负荷增大到一定程度,谐波或电压波动会成为光伏的首要约束条件,这种情况下,文献以电压偏差为约束的模型就无法可靠约束接入容量,而本文所提模型仍对配网运行参数具有约束力。综上说明本文所提模型对配网安全稳定运行的约束是有效且优越的。

对比2种规划模型所确定的优化结果和网络损耗,2种

模型寻优的光伏总接入容量相当,由式(15)可判断2种优化结果的投资运行维护成本也相当,而本文所提模型确定的网络总线路损耗为116.28kVA,文献所用模型优化结果确定的网络总线路损耗为126.75kVA,说明本文所提模型在寻优接入容量最大化的同时也兼顾了降低线路损耗的寻优目标,优化结果具有更好的经济性。

综上,说明本文所提模型在约束配网可靠运行和寻找接入方案经济最优方面是有效的且具有一定的优越性。

3.4 考虑不同因素的算例规划分析

3.4.1 不同负荷水平下的优化规划结果分析

考虑配网负荷大小对规划方案的影响,表2为光伏在不同负荷水平、功率因数为1、相同接入位置下用MPGA优化得到的光伏准入容量及最接近限值的运行参数。表中数据为标幺值,由表中数据可得,随着负荷水平的提高,配网系统对于分布式光伏的接纳能力提高,可接入容量值变大,且可看出目前负荷水平下最易发生越限的因素是电压偏差,即电压偏差是分布式光伏接入后配网安全性最先达到的限制约束。

表2 不同负荷水平下准入容量及最接近限值的运行参数

Table. 2 Maximum penetration level and operating parameters closest to limit at different load levels

参数	光伏编号				$\sum P_{PV}$	易越限因素
	节点5	节点8	节点11	节点14		
负荷大小	-0.0060	-0.0020	-0.0045	-0.0120	0.3259	节点5电压
	准入容量	0.1360	0.0542	0.0037		
负荷大小	-0.0300	-0.0100	-0.0225	-0.0600	0.3739	节点11电压
	准入容量	0.1056	0.1191	0.1060		
负荷大小	-0.0600	-0.0200	-0.0450	-0.1200	0.4190	节点11电压
	准入容量	0.1363	0.0730	0.1788		

分析可得结论:在电压偏差为约束配网安全运行的首要因素的情况下,光伏准入容量随着负荷水平的提高而变大;但当负荷大小到达一定水平,光伏的容量先达到谐波、电压

波动约束的容量上限,谐波、电压波动成为首要影响因素,此后准入容量不会随着负荷水平的提高而变动,而是限定在谐波、电压波动约束的最大限值之内。

3.4.2 不同接入方式下的优化规划结果分析

考虑光伏接入方式对优化规划结果的影响,表3为在相

同负荷水平下、功率因数为1、不同接入方案下准入容量及最接近限值的运行参数。

表3 不同接入方式下准入容量及最接近限值的运行参数

Table. 3 Maximum penetration level and operating parameters closest to limit under different access modes

接入方案/参数	光伏编号				$\sum P_{PV}$	易越限因素
	DG1	DG2	DG3	DG4		
方式1	接入位置	2	3	4	5	节点2电压
	准入容量	0.0526	0.1374	0.0551	0.0950	
方式2	接入位置	2	4	6	8	节点2电压
	准入容量	0.0412	0.1819	0.0844	0.0796	
方式3	接入位置	7	9	11	13	节点9电压
	准入容量	0.0303	0.1695	0.0852	0.0803	
方式4	接入位置	9	10	11	12	节点10电压
	准入容量	0.0539	0.135	0.0683	0.0800	
方式5	接入位置	12	14	16	18	节点16电压
	准入容量	0.0713	0.1410	0.0524	0.0782	
方式6	接入位置	15	16	17	18	节点17电压
	准入容量	0.0522	0.1318	0.0545	0.0906	

上述6种接入方案,方式1、4、6属于集中连续接入方案,方式2、3、5属于分散接入方案,方式1、2靠近馈线首端,方式3、4位于馈线中部,方式5、6靠近馈线末端。对比方式1、4、6和方式2、3、5可得结论:在相同集散接入程度下,靠近馈线首端接入的方案准入容量大,靠近馈线末端接入的方案准入容量小;对比方式1和方式2、方式3和方式4、方式5和方式6可得结论:在相同接入馈线位置的情况下,相对分

散接入下的准入容量大,相对集中接入下的准入容量小。故规划分布式光伏接入方案时,较为分散的接入馈线首端能够接入较大容量的光伏,提高光伏利用率。

3.4.3 不同功率因数下的优化规划结果分析

考虑光伏功率因数对接入规划结果的影响,表4为相同负荷水平、相同接入方式、不同功率因数情况下准入容量及最接近限值的运行参数。

表4 不同功率因数下准入容量及最接近限值的运行参数

Table. 4 Maximum penetration level and operating parameters closest to limit under different power factors

功率因数	准入容量				$\sum P_{PV}$	易越限因素
	节点5	节点8	节点11	节点14		
-0.95	0.1144	0.0197	0.0132	0.1585	0.3058	节点14电压
1	0.1360	0.0542	0.0037	0.1320	0.3259	节点5电压
0.95	0.1102	0.1039	0.1500	0.0021	0.3662	节点11电压

对比不同功率因数下的准入容量,在相同负荷水平、相同接入位置下功率因数为-0.95即注入容性无功功率的光伏可接入容量小,功率因数为0.95注入感性无功功率的光伏可接入容量大,功率因数为1的介于两者之间。前文已证明本文所分析算例负荷水平下影响准入容量的首要因素是电压偏差约束,而注入容性无功功率对节点电压的抬升作用大,相应在电压偏差范围内其允许接入的光伏容量也就变小,而注入感性无功功率会消耗系统容性无功降低电压,相应在电压偏差内允许接入的光伏容量也变大。而实际应用中,为了配网系统的安全稳定运行,要求接入的光伏尽可能的以单位功率因数运行,不要过多的参与到系统调压中。例如光伏

并网规程^[17]中规定,当配网出现故障,应立即切除分布式光伏以保证自动重合闸配置及系统可靠恢复,而若光伏功率因数过低过多参与到电压调节,其退出会造成系统无功缺额,产生过大电压波动影响系统恢复,故分布式光伏应尽可能以高功率因数运行并网。

综上所述,负荷水平、接入方式、光伏功率因数都会对规划结果产生影响,一定负荷水平内,可随负荷增加而增加光伏接入容量,光伏以分散的方式接入馈线首端可提高可接入容量,光伏应尽可能以单位功率因数接入。计算表明进行优化规划时应充分考虑相关因素对规划方案的影响,对于提高优化规划的合理性具有重要的意义。

4 结 论

本文提出一种考虑有源配电网经济性和安全性的分布式光伏优化规划方法，并以 IEEE 33 节点系统为例进行研究分析，结论如下：

- 1) 以单条配网馈线为例，理论推导了分布式光伏接入容量和接入位置对配网节点电压、谐波指标、电压波动影响的一般规律，可为光伏优化规划提供理论性规律参考。
- 2) 提出一种以配网最易越限的电压偏差、电压波动、谐波作为网络安全约束，以加权融合的网络经济性指标为规划目标的多目标约束优化规划模型，并通过设置对比实验证所用多种群遗传算法的有效性和模型约束配网安全运行和寻找接入方案经济最优的有效性。
- 3) 结合算例分析负荷水平、接入方案、功率因数对光伏接入规划结果的影响，结论对合理规划分布式光伏的选址定容具有参考借鉴价值。
- 4) 本文所提模型只考虑了分布式电源中光伏电源，未考虑风力发电机、燃料电池、储能装置等其他形式的分布式电源，后续将在本文基础上研究相关内容，为分布式电源发展提供参考。

[参考文献]

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on the effect of large-scale photovoltaic generation on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] SARA E, GERALD T, VIJAY V, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power system[J]. IEEE transactions on power systems, 2013, 28(1): 317-325.
- [3] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE transactions on power systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [4] SHENG W, LIU K, CHENG S. Optimal power flow algorithm and analysis in distribution system considering distributed generation[J]. IET generation, transmission & distribution, 2014, 8(2): 261-272.
- [5] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 108-113.
ZHONG Q, GAO X H, YU N H, et al. Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraint in active distribution networks [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(24): 108-113.
- [6] 陶顺, 郭静, 肖湘宁. 基于电流保护原理的DG准入容量与并网位置分析[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 260-270.
TAO S, GUO J, XIAO X N. Analysis on allowed penetration level of distributed generation and its grid-connected position based on principles of current protection [J]. Power system technology, 2012, 36(1): 265-270.
- [7] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280.
ZOU H L, HAN X Y, LIAO Q F, et al. Analysis of the penetration capacity of distributed generation considering voltage quality and short-circuit capacity constraints [J]. Power system technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [8] 李滨, 潘国超, 陈碧云, 等. 满足电能质量限值的分布式光伏极限峰值容量计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 43-50.
LI B, PAN G C, CHEN B Y, et al. Limit peak capacity calculation of distributed photovoltaic with power quality constraints [J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(14): 43-50.
- [9] 李振坤, 田源, 董成明, 等. 基于随机潮流的含电动汽车配电网内分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 60-66.
LI Z K, TIAN Y, DONG C M, et al. Distributed generation planning in distribution network with electric vehicle based on probabilistic power flow [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(16): 60-66.
- [10] 曾鸣, 杜楠, 张鲲, 等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 954-959.
ZENG M, DU N, ZHANG K, et al. Distributed generation planning based on multi-objective static fuzzy model [J]. Power system technology, 2013, 37(4): 954-959.
- [11] 张君则, 艾欣. 基于粒子群算法的多类型分布式电源并网位置与运行出力综合优化算法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3372-3377.
ZHANG J Z, AI X. Integrated optimization algorithm for grid-connected position and operation output of multi-type distributed generation based on particle swarm optimization [J]. Power system technology, 2014, 38(12): 3372-3377.
- [12] 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): 156-161.
YANG W R, WU H Y, LI L B, et al. Distributed generation planning based on artificial fish swarm algorithm in distribution network [J]. Power system protection and control, 2010, 38(21): 156-161.
- [13] GB/T 12325—2008, 电能质量供电电压偏差[S].
GB/T 12325—2008, Power quality-deviation of supply voltage[S].

- [14] GB/T 12326—2008, 电能质量电压波动和闪变[S].
GB/T 12326—2008, Power quality-voltage fluctuation and flicker[S].
- [15] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306.
LIU J, HUANG W. Analysis on grid-connectible capacity under the condition of distributed photovoltaic power sources distribution close to load distribution [J]. Power system technology, 2015, 39(2): 299-306.
- [16] GB/T 14549—1993, 电能质量公用电网谐波[S].
GB/T 14549—1993, Power quality-harmonics in public supply network[S].
- [17] GB/T 19939—2005, 光伏系统并网技术要求[S].
GB/T 19939—2005, Technical requirements for grid connection of Photovoltaic system[S].
- [18] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [19] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.
LIU K Y, LIU Y M, SHENG W X, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [20] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 87-92.
SU X L, HAN M X, ZHAO Z K, et al. Analysis of the maximum penetration capacity of distributed generation in distribution network [J]. Power system technology, 2012, 36(10): 87-92.

PLANNING RESEARCH OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC SOURCE ACCESS DISTRIBUTION NETWORK BASED ON MULTI-POPULATION GENETIC ALGORITHM

Liu Keyan¹, Sheng Wanxing¹, Ma Xiaochen², Li Yunhua², Dong Weijie¹, Yang Liman²

(1. Institute of Power Distribution, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Specified on the optimal planning problem in the distributed photovoltaic source accessed distribution network, an innovative photovoltaic source grid connected planning method is proposed with consideration both on economy and safety. Taking the maximum access capacity, the lowest investment, operation and maintenance cost, and the smallest active power loss of the network as the economic planning objective, and taking the voltage deviation, voltage fluctuation and harmonic quality as planning constraints, a multi-objective constrained optimization model of the photovoltaic grid-connected is established. A multi-population genetic algorithm is used to solve the planning model. The optimization search is fulfilled by using multiple populations with different control parameters. Meanwhile, the fitness function calibration and adaptive algorithm are introduced in the operation of a single population, thereby, overcoming the defects of the immature convergence of the algorithm. The proposed method is implemented on the IEEE 33 node distribution network model. Results conform the validity of the proposed model and the method. The planning schemes under different loads, access schemes and power factors are compared and researched. General influencing rule of different factors on the results is summarized.

Keywords: distributed PV power generation; power quality; constrained optimization; active distribution network; multi-population genetic algorithm