光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023011102

基于广义短路比约束的光伏最大准入容量优化

张晓雨*，王　英，吴卓娟

（国网山西省电力公司朔州供电公司，山西 朔州 036000）

摘　要： 光伏容量的增加会导致系统出现小干扰稳定问题，广义短路比指标可反映多光伏馈入系统的小干扰稳定性。基于此，提出了在广义短路比约束条件下，多光伏馈入交流网络中任意节点的最大准入容量优化方法。首先，建立多光伏馈入系统的小干扰稳定性分析模型；其次，以未降阶拓展阻抗矩阵的形式表达广义短路比，考虑光伏接入网络中任意节点的情况，建立基于广义短路比约束的光伏最大准入容量优化模型，并采用改进的粒子群算法进行模型的求解。最后，通过仿真验证了该方法的正确性。

关键词： 小干扰稳定性；广义短路比；最大准入容量；改进粒子群算法

中图分类号： TM712　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0486－07

Photovoltaic Maximum Admission Capacity Optimization Based on Generalized Short Circuit Ratio Constraint

ZHANG Xiaoyu, WANG Ying, WU Zhuojuan

(State Grid Shuozhou Electric Power Supply Company, Shuozhou 036000, CHN)

Abstract: The increase of photovoltaic capacity will lead to the small signal stability problem of the system. The generalized short circuit ratio index can be used to describe the small signal stability of the multi-photovoltaic feed-in system. Based on this, a maximum admission capacity optimization method for any node in the multi-photovoltaic feed-in AC network under the generalized short circuit ratio constraint is proposed. Firstly, the small signal stability analysis model of multi-photovoltaic feed-in system was established. Secondly, the generalized short circuit ratio was expressed in the form of unreduced extended impedance matrix. Considering the situation of any node in the photovoltaic access network, the maximum access capacity optimization model of photovoltaic based on generalized short circuit ratio constraint was established, and the improved particle swarm optimization algorithm was used to solve the model. Finally, the correctness of the method was verified by simulation.

Key words: small singal stability; generalized short circuit ratio; maximum capacity optimization; improved PSO

0　引言

高比例可再生能源的广泛接入和高比例电力电子设备的大规模应用不仅是未来新型电力系统的主要特征，也是支撑实现“双碳”目标的核心手段[1]。光伏(Photovoltaic，PV)发电作为太阳能的一种主要利用方式，其高比例接入电网已成为必然趋势[2]。但是，光伏机组通过电力电子换流设备接入电网，无法对交流电网提供惯量及电压支撑，接入容量的增加，将导致电网强度下降，容易出现小干扰稳定性的

收稿日期：2023－01－11.

基金项目：国网山西省电力公司朔州供电公司科技项目 14(5205F0220001).

* **通信作者：**张晓雨　**E-mail：** shuozhoubaohu@126.com

问题[3-4]。

在此背景下，研究多 PV 馈入系统的最大准入容量显得尤为必要。目前的主流方法是研究 PV 接入电网的位置和容量对系统各个参数的影响[5-7]。大部分研究集中在提高含有 PV 的电力系统的静态电压稳定性、可靠性和经济性等方面，很少对系统小干扰稳定性约束下的最大准入容量作深入研究。

广义短路比(Generalized Short Circuit Ratio，gSCR)是一种能够表征多电力电子馈入系统强度以及反映系统运行风险的指标，其值与阻尼比呈现正相关关系，因此可一定程度上量化系统的小干扰稳定性[8]。文献[9]利用阻尼比灵敏度指导光伏接入网络的位置和容量，但是弱阻尼振荡模式的阻尼比在实际高比例新能源并网中计算量巨大，较难实现。文献[10]利用广义短路比关于各馈入点接入容量的灵敏度，提出了三光伏馈入系统定容量优化方法。文献[11]利用等广义短路比灵敏度准则，对可再生能源的容量进行优化配置，以提高系统的小干扰稳定性。但是文献[10]和文献[11]均是假设新能源接入交流网络中的固定节点，未考虑新能源接入网络中任意节点的情况。因此，所研究的容量优化方法具有局限性。

基于以上分析，本文利用 gSCR 指标与小干扰稳定性成正比的表征关系，引入 gSCR 指标，构建的多 PV 馈入系统最大准入容量优化模型，解决较为复杂的优化问题，gSCR 的计算仅与 PV 接入容量和交流网络的拓扑结构相关，相对于常用的阻尼比方法，计算难度大大降低。考虑到 PV 接入网络中任意节点的情况，以未降阶拓展阻抗矩阵的形式表示 gSCR，并采用了改进的粒子群优化(Particle Swarm Optimization，PSO)算法进行模型求解。最后，通过仿真验证该方法的准确性。

1　多 PV 馈入系统 gSCR

含有 n 台 PV 的多馈入系统结构图如图 1 所示，图中节点 1～n 为 PV 馈入节点；各馈入节点的电压幅值和相角分别为 U_i 和 θ_i；各 PV 注入交流网络的有功和无功功率分别为 P_i 和 Q_i；节点 $n+1$ 到节点 $n+m$ 为网络中的无源节点；节点 $n+m+1$ 到 $n+m+r$ 为所接入的无穷大电源节点。

多 PV 馈入系统可以看作由 PV 与电力电子设备侧(简称 PV 侧)与交流网络侧两部分组成。由文献[8]可知，想要得到描述多 PV 馈入系统小干扰稳定性的闭环特征方程需要先获得 PV 侧与交流网络侧的雅可比传递函数矩阵。

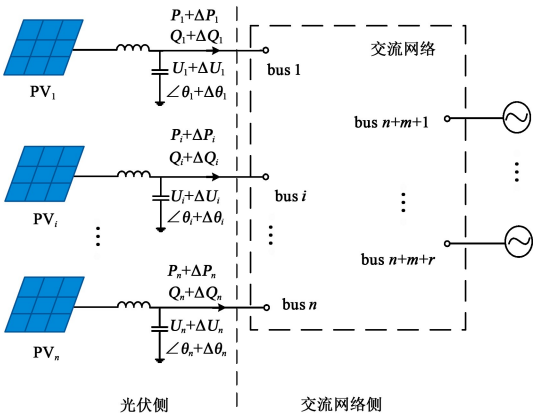


图 1　多 PV 馈入系统结构图

1.1　PV 侧雅可比传递函数矩阵

PV 馈入系统的 PV 变流器控制模型如图 2 所示，其控制系统包括直流电压外环，交流电流内环和锁相环三部分。图中 E 为无穷大电源电压幅值，角度为 0°；U 和 θ 分别为变流器并网点电压和相角；U_c 和 θ_c 分别为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation，PWM)电压和相角；C_{dc} 表示直流侧电容；L_f 和 C_f 分别表示变流器端口滤波器的电感和电容，L_g 表示交流网络侧等效电感；θ_{pll} 表示锁相环角度；U_{dc} 和 U_c^{ref} 分别表示直流电容电压及其参考值；I_{cabc} 和 I_{abc} 分别表示滤波电感和交流网络侧等效电感上流过的电流；P_i 和 P_c 分别表示光伏阵列的发电功率和直流侧的实际输出功率；$G_{pll}(s)=k_{ppll}/s+k_{ipll}/s^2$，$G_1(s)=k_{p1}+k_{i1}/s$ 和 $G_2(s)=k_{p2}+k_{i2}/s$ 分别为锁相环、直流电压外环和电流内环传递函数。

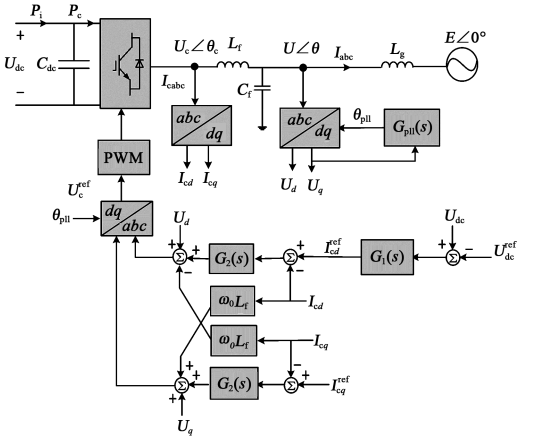


图 2　PV 变流器控制模型

根据图 2 可写出 d-q 控制坐标系 PV 侧的动态

方程如(1)～(4)所示：

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{pll}}=G_{\mathrm{pll}}(s)U_q\\ \omega=s\theta_{\mathrm{pll}}+\omega_0\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}U_{\mathrm{dc}}C_{\mathrm{dc}}\dfrac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{c}}\\ I_{cd}^{\mathrm{ref}}=(U_{\mathrm{dc}}-U_{\mathrm{dc}}^{\mathrm{ref}})G_1(s)\end{cases}\tag{2}$$

$$\begin{cases}U_{cd}^{\mathrm{ref}}=(I_{cd}^{\mathrm{ref}}-I_{cd})G_2(s)+U_{\mathrm{d}}-\omega_0L_{\mathrm{f}}I_{cq}\\ U_{cq}^{\mathrm{ref}}=(I_{cq}^{\mathrm{ref}}-I_{cq})G_2(s)+U_q+\omega_0L_{\mathrm{f}}I_{cd}\end{cases}\tag{3}$$

$$\begin{cases}U_{cd}=U_{\mathrm{d}}+sL_{\mathrm{f}}I_{cd}-\omega L_{\mathrm{f}}I_{cq}\\ U_{cq}=U_q+sL_{\mathrm{f}}I_{cq}+\omega L_{\mathrm{f}}I_{cd}\end{cases}\tag{4}$$

式中，下标 0 表示在该物理量的稳态运行点的值。

1.2 多 PV 馈入系统 gSCR

文献[8]基于三个假设提出的广义短路比可以从小干扰稳定性的角度评估多 PV 馈入系统的相对强度。根据广义阻抗分析法和多变量频域控制理论，结合 PV 侧雅可比传递函数矩阵和交流网络侧雅可比传递函数矩阵(其表达式参考文献[8])，得到描述整个多 PV 馈入系统小干扰稳定性的闭环特征方程如式(7)：

$$\det\left(\begin{bmatrix}0 & E_{PU}(s)\\ E_{Q\theta}(s) & 0\end{bmatrix}\otimes\boldsymbol{I}_n+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & -\boldsymbol{P}\\ -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}+\boldsymbol{\gamma}(s)\otimes\boldsymbol{J}_{\mathrm{eq}}\right)=0\tag{7}$$

$$\boldsymbol{\gamma}(s)=\begin{bmatrix}-\alpha(s) & -\beta(s)\\ \beta(s) & -\alpha(s)\end{bmatrix}\tag{8}$$

式中，det[ ]为求行列式，符号⊗为求克罗内克(Kronecker)积，$\boldsymbol{I}_n$ 为 n 阶单位矩阵，$\boldsymbol{P}=\mathrm{diag}(P_1,P_2,\cdots,P_n)$ 为 PV 在自身额定容量下的有功功率标幺值，$\alpha(s)=\omega_0^2/(s^2+\omega_0^2)$，$\beta(s)=s\omega_0/(s^2+\omega_0^2)$，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{eq}}$ 为拓展导纳矩阵。

求解式(7)的 s 值可判断系统的小干扰稳定性。

文献[8]将拓展导纳矩阵 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{eq}}$ 的最小特征值定义为广义短路比 gSCR 值，以此来反映整个多 PV 馈入系统的小干扰稳定性，其表达式为：

$$K_{\mathrm{gSCR}}=\min\lambda(\boldsymbol{J}_{\mathrm{eq}})=\min\lambda(-\boldsymbol{S}_B^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{red}})\tag{9}$$

式中，K_{gSCR} 为 gSCR 值，$\lambda(\cdot)$为求取矩阵特征值函数，$\boldsymbol{S}_B=\mathrm{diag}(S_{B1},S_{B2},\cdots,S_{Bn})$ 为各馈入 PV 的额定容量，$-\boldsymbol{B}_{\mathrm{red}}$ 为消去无源节点后的降阶导纳矩阵。降阶之前的节点导纳矩阵表示为 $-\boldsymbol{B}$，其分块矩阵式中，s 为拉普拉斯算子，ω 和 ω_0 分别为角频率实际值和额定值，下标 d，q 分别为对应电气量的 d，q 轴分量，上标 ref 为对应电气量的参考值。

在上述 PV 馈入系统中，PV 均采用单位功率因数的功率控制方式，且 PWM 近似为平均模型并忽略采样延时。将式(1)～(4)在平衡点处线性化并整理得到 PV 侧雅可比传递函数矩阵如下：

$$\begin{pmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & E_{PU}(s)\\ E_{Q\theta}(s) & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\theta\\ \Delta U/U_0\end{pmatrix}\tag{5}$$

$$\begin{cases}E_{PU}(s)=P\dfrac{U_{\mathrm{dc0}}C_{\mathrm{dc}}s[sL_{\mathrm{f}}+G_2(s)]+G_1(s)G_2(s)sL_{\mathrm{f}}L_{cd0}}{U_{\mathrm{dc0}}C_{\mathrm{dc}}s(L_{\mathrm{f}}+G_2(s))+G_1(s)G_2(s)(sL_{\mathrm{f}}I_{cd0}+U_0)}\\ E_{Q\theta}(s)=\dfrac{P}{1+G_{\mathrm{pll}}(s)U_0}\left(1+\dfrac{sL_{\mathrm{f}}G_{\mathrm{pll}}(s)}{sL_{\mathrm{f}}+G_2(s)}U_0\right)\end{cases}\tag{6}$$

形式为(使用符号≙表示矩阵的维数)：

$$-\boldsymbol{B}=-\begin{pmatrix}\boldsymbol{B}_{11} & \boldsymbol{B}_{12}\\ \boldsymbol{B}_{21} & \boldsymbol{B}_{22}\end{pmatrix}\triangleq\begin{pmatrix}n\times n & n\times m\\ m\times n & m\times m\end{pmatrix}\tag{10}$$

式中，$-\boldsymbol{B}$ 为网络结构保持下的节点导纳矩阵，n 为 PV 接入的节点，m 为无源节点。此处 $B_{ii}<0$。

通过 Kron 降阶消去内部无源节点而不影响系统的小干扰稳定性[12]，得到 gSCR 表达式中的降阶节点导纳矩阵 $-\boldsymbol{B}_{\mathrm{red}}$：

$$-\boldsymbol{B}_{\mathrm{red}}=-(\boldsymbol{B}_{11}-\boldsymbol{B}_{12}\boldsymbol{B}_{22}^{-1}\boldsymbol{B}_{21})\tag{11}$$

由式(9)可知，gSCR 值与交流网络的导纳矩阵和 PV 接入的容量有关。已有大量研究证明，随着 PV 接入容量的增加，将会恶化系统的小干扰稳定性，导致系统阻尼比降低，gSCR 值减小。因此，在满足一定的小干扰稳定裕度 (即 gSCR)的条件下，PV 的接入容量存在最大值。

2 多 PV 馈入系统最大准入容量求解方法

2.1 最大准入容量优化模型

在电力系统分析中，一般利用主导特征根的阻尼比表征电力系统的小干扰稳定裕度。然而，通过构建多 PV 馈入系统的详细模型来计算系统的主导特征根十分困难，存在“维数灾难”问题。

由于多 PV 馈入系统 gSCR 与系统阻尼比存在正相关的关系。且 gSCR 在计算时，不需要考虑 PV 的控制方式与详细参数，仅由 PV 容量和交流网络的导纳矩阵即可求出，计算量大大减少，不存在求解阻尼比时的“维数灾难”问题，更具有优越性。因此

将 gSCR 指标引入考虑小干扰稳定性的最大准入容量优化模型时，即可将优化模型转化为基于 gSCR 约束的最大准入容量优化模型。实际运行时，通常假定主导特征根的阻尼比大于 0.05 作为稳定运行状态[13]，因此本文将阻尼比等于 0.05 时所对应的 gSCR 值定义为系统参考临界短路比（Reference Short Circuit Critical Ratio，RCSCR）值，基于 gSCR 约束的多 PV 馈入系统的最大准入容量优化模型可以表示为：

$$\begin{aligned} f(S_{Bi}) &= \max \sum_{i=1}^{n} S_{Bi} \\ \text{s.t.} \quad & K_{\text{gSCR}} \geqslant K_{\text{RCSCR}} \\ & S_{Bi} > 0 \end{aligned} \tag{12}$$

式中，f 为目标函数，S_{Bi} 为节点 i 接入 PV 的容量，n 为 PV 的数量，K_{gSCR} 为系统 gSCR 值，K_{RCSCR} 为系统 RCSCR 值。

但式(12)所表达的容量优化模型考虑并不全面。由式(9)可知，gSCR 的表达式中 $-\boldsymbol{B}_{\text{red}}$ 为通过 Kron 降阶消去无源节点后的压缩导纳矩阵，因此未考虑到 PV 接入网络中任意节点的情况。针对该不足，基于式(9)，将 gSCR 以未降阶拓展阻抗矩阵的形式表示。其表达式为：

$$K_{\text{gSCR}} = \min\lambda(-\boldsymbol{S}_{Bk}^{-1}\boldsymbol{B}_{\text{red}k}) = \frac{1}{\max\lambda(-\boldsymbol{Z}\boldsymbol{S}_{Bmk})} \tag{13}$$

其中，

$$-\boldsymbol{Z}^{-1} = -\boldsymbol{B} = -\begin{pmatrix} \boldsymbol{B}_{11} & \boldsymbol{B}_{12} \\ \boldsymbol{B}_{21} & \boldsymbol{B}_{22} \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} k \times k & k \times (n+m-k) \\ (n+m-k) \times k & (n+m-r) \times (n+m-k) \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{S}_{\text{B}mk} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{S}_{Bk} & \\ & 0 \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} k \times k & k \times (n+m-k) \\ (n+m-k) \times k & (n+m-k) \times (n+m-k) \end{pmatrix} \tag{15}$$

式中，k 为接入 PV 的节点（包括交流网络中的无源节点），$-\boldsymbol{B}_{\text{red}k} = -(\boldsymbol{B}_A - \boldsymbol{B}_B\boldsymbol{B}_D^{-1}\boldsymbol{B}_C)$。式(13)的证明过程参考文献[14]矩阵广义特征值相关知识。式(12)的最大准入容量优化模型可以改进为：

$$\begin{aligned} f(S_{Bi}) &= \max \sum_{i=1}^{n+m} S_{Bi} \\ \text{s.t.} \quad & \rho(-\boldsymbol{Z}\boldsymbol{S}_{Bm}) \leqslant K_{\text{RCSCR}}^{-1} \\ & S_{Bi} \geqslant 0 \end{aligned} \tag{16}$$

式中，ρ 为谱半径，即矩阵 $-\boldsymbol{Z}\boldsymbol{S}_{Bm}$ 的最大特征值。

如式(16)所示，通过将 gSCR 指标以未降阶拓展阻抗矩阵的形式表示之后，可以考虑到 PV 接入网络中任意节点的情况。

2.2　改进的 PSO 算法

PSO 算法对求解大规模优化问题具有很快的收敛速度和全局寻优能力[15]。在每次迭代过程中，每个粒子都将更新其速度和位置，并记录最佳适应度值，最终得出最优解。粒子的速度和位置更新公式如下：

$$\begin{cases} v_{ij}^{(k+1)} = w v_{ij}^{k} + c_1 r_1 (Pbest_{ij} - x_{ij}^{k}) + \\ \qquad c_2 r_2 (Gbest_j - x_{ij}^{k}) \\ x_{ij}^{(k+1)} = x_{ij}^{k} + v_{ij}^{(k+1)} \end{cases} \tag{17}$$

式中，k 为迭代次数，v_{ij}^{k} 和 x_{ij}^{k} 分别为当前粒子的 N 维的速度和 N 维的位置；$Pbest$ 和 $Gbest$ 分别为上一次迭代过程中粒子的个体最优位置和整个群体的最优位置；c_1 和 c_2 为粒子的学习因子；r_1 和 r_2 为粒子(0,1)之间的随机数；w 为粒子的惯性权重，其表达式如下：

$$w^{k} = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})(k/k_{\max}) \tag{18}$$

虽然 PSO 收敛速度快，但其收敛精度较低，容易陷入局部最优解。模拟退火算法（Simulated Annealing，SA）[16]是一种随机性组合优化方法，其全局搜索能力较强，在迭代过程中能够以一定的概率接受较差点，因而具有收敛到全局最优解的能力。

考虑以上两个算法优缺点的特性，本文利用模拟退火算法的优点对粒子群算法进行改进，即以 PSO 算法的运算流程为主体，将 SA 算法的概率突跳能力引入 PSO 算法之中。对每个粒子的个体极值 $Pbest$ 进行抽样，先对 $Pbest_{\text{old}}$ 添加适当的随机扰动，产生一个新值 $Pbest_{\text{new}}$，并根据式(19)所示的 Metropolis 准则对 $Pbest$ 值进行优选，将其结果作为下一代群体中各个体的历史最优解，并以其中的最好解作为 PSO 算法的整个群体最优解 $Gbest$，最终得到 PV 的最大准入容量的最优解。

$$\begin{cases} Pbest_{\text{old}} = Pbest_{\text{new}} \\ \text{IF } \Delta f < 0 \quad \text{or} \quad \exp(-\Delta f/T) > \text{rand}(0,1) \end{cases} \tag{19}$$

式中，IF 为满足相应的条件接受新解；Δf 为新旧解适应度函数的差值；T 为退火温度；rand(0,1)为(0,1)之间的随机数。

对于优化模型式(17)中的 gSCR 约束条件，通

过引入惩罚函数，即对原来的目标函数引入惩罚项处理约束条件，原目标函数中加入惩罚项之后，使用改进的 PSO 对多 PV 馈入系统的最大准入容量优化问题进行求解，当生成的粒子满足约束条件时，新构建的目标函数适应度值与原目标适应度值相等；当不满足约束条件时，所得的适应度值远小于目标适应度值，不符合要求，则舍弃此时生成的粒子。表达形式如下：

$$\max F(x)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}F(x)=f(x)-\mu\{\max[0,g(x)]\}^2\\ g(x)\leqslant 0\end{cases}\tag{20}$$

式中，μ 为惩罚因子，取较大的正数，$g(x)$为不等式约束，$f(x)$为原目标函数，$F(x)$为增加了惩罚项后的增广目标函数。

2.3 最大准入容量求解流程

运用 2.2 节所示的改进 PSO 算法的方法进行多 PV 馈入系统最大准入容量优化模型的求解，流程图如图 3 所示。

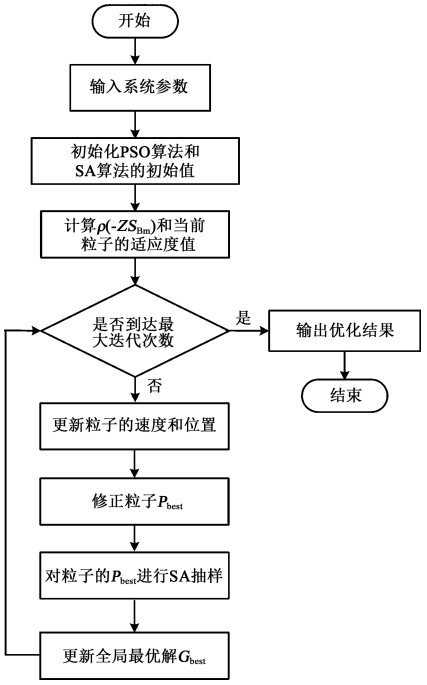


图 3 多 PV 馈入系统的最大准入容量求解流程图

该方法具体优化步骤如下：

步骤 1：输入光伏并网系统参数，包括交流网络的拓扑结构、线路阻抗及参考临界广义短路比值 K_{RCSCR}。

步骤 2：改进 PSO 参数初始化，包括初始化粒子种群的位置和速度、粒子种群的大小、设定的最大迭代次数，以及模拟退火算法的初始温度 T 和退火参数等。

步骤 3：根据粒子的初始位置，即对应节点接入 PV 的容量值形成容量对角矩阵，并且粒子的初始位置形成相应的导纳矩阵 $-\boldsymbol{B}$，对其求逆得到阻抗矩阵 $-\boldsymbol{Z}$。求解扩展阻抗矩阵 $-\boldsymbol{ZS}_{Bm}$ 的谱半径 ρ，并计算当前粒子的适应度值。

步骤 4：根据公式(17)更新粒子的速度公式和位置公式，并满足相应约束条件。

步骤 5：计算适应度值并更新 *Pbest*。

步骤 6：根据 SA 算法对种群粒子的 *Pbest* 进行抽样，计算新解与旧解的适应度函数差值，按照 metropolis 准则判别标准接受或舍弃新解。

步骤 7：根据步骤 6 的结果更新粒子的全局最优值 *Gbest* 和全局最优位置。判断是否达到最大迭代次数，满足条件则执行步骤 8，否则执行步骤 4。

步骤 8：输出最优解。程序结束。

3 算例分析

本文以某地实际配网为例，其拓扑如图 4 所示，图中共有 15 个节点，其中节点 1 至节点 6 为考虑接入 PV 的节点，节点 8 至节点 14 为已接入风电的节点，其中节点15为无穷大电网接入节点。PV的控

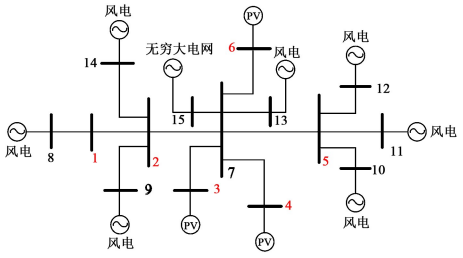


图 4 某地实际配网系统示意图

表 1 PV 自身基准容量下的参数标幺值

参数名称	数值
基准容量/MW	100
交流测基准电压/kV	110
电容电压参考值 $U_{\mathrm{dc}}^{\mathrm{ref}}$(p. u)	1
直流侧电容 C_{dc}(p. u)	0.03
电流内环 q 轴参考电流 I_{cq}^{ref}(p. u)	0
滤波电感 L_{f}(p. u)	0.05
电压外环控制 P 参数 k_{p1}	0.5
电压外环控制 I 参数 k_{i1}	10
电流内环控制 P 参数 k_{p2}	4
电流内环控制 I 参数 k_{i2}	20
锁相环控制 P 参数 k_{ppll}	20
锁相环控制 I 参数 $k_{i\mathrm{pll}}$	5 000

表 2　某地实际配网系统线路参数

节点 i	节点 j	阻抗(p. u)
1	2	0.022 5
1	8	0.020 8
2	7	0.007 8
2	9	0.024 0
2	14	0.030 5
3	7	0.012 3
4	7	0.055 4
5	7	0.057 8
5	10	0.036 9
5	11	0.038 3
5	12	0.030 4
6	7	0.012 3
7	13	0.056 9
7	15	0.05

表 3　实际各风电设备容量分配情况

节点编号	接入容量(p. u)
8	0.8
9	0.995
10	0.06
11	0.06
12	0.24
13	1.485
14	0.1

制方式采用图 2 所示的控制方式，其控制参数如参考表 1。系统的线路参数如表 2 所示，已有风电的接入容量如表 3 所示。

通过计算得到，在如表 1 所示的 PV 控制参数下的 K_{RCSCR} 值为 3.0。采用改进的 PSO 算法求解 PV 最大准入容量时，其初始参数设置如下：种群大小为 50 个，最大迭代次数为 250 次，学习因子 c_1 与 c_2 为 1.49，初始温度 T 为 10 000 ℃，降温速率为 0.9，惯性权重最大值 $w_{\max}$ 和最小值 $w_{\min}$ 分别为 0.9 和 0.4。

采用改进 PSO 算法求解 PV 最大准入容量优化模型，迭代过程如图 5 所示。

从图 5 可知，在迭代至 75 代左右的时候，迭代曲线逐渐收敛。基于改进粒子群算法求得的最大准入容量为 2.94 p. u，各个节点接入的容量分配情况如表 4 所示。其中，节点 1 和 5 在优化中不适合接入 PV。为了验证改进算法的优越性，采用了各节点等容量接入 PV 作为对比实验，即节点 1 至节点 6 均匀接入 PV，初始状态为各节点分别接入容量为 0.001 p. u，每次增加各 PV 容量的步长为 0.000 1 p. u，该方法下其总容量为 2.689 8 p. u，各 PV 的接入容量均相等，其大小为 0.448 4 p. u。

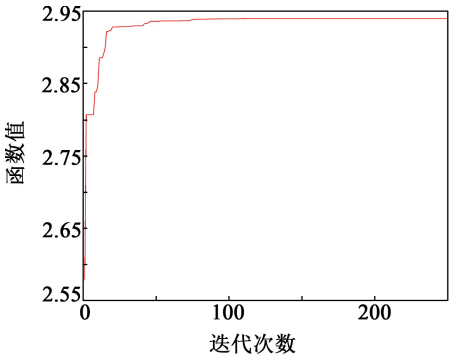


图 5　基于改进粒子群算法迭代过程

表 4　基于改进粒子群算法的各光伏设备容量分配

节点编号	接入容量(p. u)
1	0
2	0.460 3
3	1.117 6
4	0.245 7
5	0
6	1.116 4

以上两种方法所得结果的 gSCR 值均为 $K_{\mathrm{gSCR}}=K_{\mathrm{RCSCR}}$，采用改进的 PSO 计算出来的结果更大，因此两种方法相比较，采用改进粒子群算法求解出的光伏并网容量更大，更具有优越性。

实际接入 PV 的容量分配如表 5 所示。其接入的总容量为 2.817 6。总容量与改进的 PSO 计算的结果相近。

表 5　实际电网光伏设备容量分配

节点编号	接入容量(p. u)
1	0
2	0
3	1
4	0.317 6
5	0
6	1.5

以上分析说明采用改进粒子群算法求解出的 PV 最大准入容量优化方法具有有效性和优越性。

4　结论

广义短路比可以用作描述多光伏馈入系统的小干扰稳定性，本文基于此指标研究了满足系统的小干扰稳定性情况下，多光伏馈入系统的最大准入容量。以未降阶拓展阻抗矩阵的形式表示广义短路比，该方式包含了交流网络中的无源节点，因而考虑了光伏接入交流网络中任意节点的情况，采用改进的粒子群算法对模型进行求解，确定光伏接入系统的最大准入容量，该方法为多馈入系统的并网稳定

性描述提供了参考和新的思路。此外,考虑多种不同控制方式的多样化新能源的接入电网下的最大准入容量是下一步亟需展开研究的方向。

参考文献:

[1] 周孝信,赵 强,张玉琼."双碳"目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J]. 中国电力企业管理,2021,652(31):14-17.
Zhou Xiaoxin, Zhao Qiang, Zhang Yuqiong. Development prospects and key technologies of China's energy power system under the "Double Carbon" target[J]. China Power Enterprise Management, 2021, 652(31): 14-17.

[2] 常建国,付梦菲. 基于PVsyst软件的屋顶光伏发电系统发电量的研究[J]. 太阳能,2022,343(11):81-87.
Chang Jianguo, Fu Mengfei. Research on power generation of roof photovoltaic power generation system based on PVsyst software[J]. Solar Energy, 2022, 343(11): 81-87.

[3] 王若谷,刘佳玲,刘宛菘,等. 基于PSO算法的直流近区光伏发电系统控制参数优化方法[J]. 电工电能新技术,2021,40(12):19-29.
Wang Ruogu, Liu Jialing, Liu Wansong, et al. Optimization method for control parameters of DC near-field photovoltaic power generation system based on PSO algorithm[J]. New Technology of Electrical Energy, 2021, 40(12): 19-29.

[4] 颜 琳. 大规模光伏发电对电力系统的影响[J]. 中国高新科技,2020,81(21):83-84.
Yan Lin. Impact of large-scale photovoltaic power generation on power system[J]. China High and New Technology, 2020, 81(21): 83-84.

[5] 王文宾,朱燕舞,韩天华,等. 基于随机规划的分布式光伏并网最大准入容量计算[J]. 燕山大学学报,2018,42(6):510-518.
Wang Wenbin, Zhu Yanwu, Han Tianhua, et al. Calculation of maximum access capacity for distributed photovoltaic grid connection based on stochastic planning[J]. J. of Yanshan University, 2018, 42(6): 510-518.

[6] 林其友,衣 涛,杨乐新. 一种可再生能源并网的最大容量边界计算方法[J]. 电网与清洁能源,2021,37(7):130-135.
Lin Qiyou, Yi Tao, Yang Lexin. A calculation method for maximum capacity boundary of renewable energy grid connection[J]. Power Grid and Clean Energy, 2021, 37(7): 130-135.

[7] 李秀俊,邹旻昊,周力行. 考虑负荷不确定性的分布式光伏电源最大准入功率的计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2):181-186.
Li Xiujun, Zou Minhao, Zhou Lixing. Calculation of maximum allowable power of distributed photovoltaic power supply considering load uncertainty[J]. Power Capacitor and Reactive Compensation, 2020, 41(2): 181-186.

[8] 辛焕海,董 炜,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
Xin Huanhai, Dong Wei, Yuan Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio of power electronics multi infeed power system[J]. Chinese J. of Electrical Engineering, 2016, 36(22): 6013-6027.

[9] 马燕峰,景 雪,赵书强,等. 光伏接入系统的小干扰稳定灵敏度分析及其应用[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):70-75.
Ma Yanfeng, Jing Xue, Zhao Shuqiang, et al. Small signal stability sensitivity analysis of photovoltaic access system and its application[J]. Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 70-75.

[10] 黄 锐,兰 洲,辛焕海,等. 基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):147-154.
Huang Rui, Lan Zhou, Xin Huanhai, et al. Capacity optimization method of photovoltaic multi infeed system based on generalized short circuit ratio[J]. Power System Automation, 2019, 43(3): 147-154.

[11] Liang Huiyu, Niu Shuanbao, Ke Xianbo, et al. Optimal capacity allocation of renewable energy generation base for small signal stability improvement[C]// IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2019: 1772-1776.

[12] Florian D, Francesco B. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Ⅰ: Regular Papers, 2012, 60(1): 150-163.

[13] 张小刚. 大规模风电接入对电网阻尼影响研究[D]. 南京:东南大学,2015.
Zhang Xiaogang. Research on the impact of large-scale wind power access on grid damping[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[14] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
Zhang Xianda. Matrix Analysis and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proc. of IEEE International Conf. on Neural Networks, 1995, 4: 1942-1948.

[16] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenb-Luth M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines[J]. J. Chem. Phys., 1953, 21(6): 1087-1092.

作者简介:

张晓雨(1986—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。