

文章编号:0254-0096(2019)01-0103-09

# 基于混沌粒子群算法的光伏电站站内无功优化

马卫<sup>1</sup>, 周林<sup>1</sup>, 王艺环<sup>2</sup>, 邵念彬<sup>3</sup>, 郝高锋<sup>1</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司郫县供电分公司, 成都 611730; 3. 华东电力设计院, 上海 200063)

**摘要:** 光照强度的变化不仅会造成光伏电站并网点电压波动,而且可能会导致光伏发电单元出口电压越限,呈现较大的时空分散特性。并且随着光伏有功出力增加,光伏电站的稳定性会下降。针对上述问题,在建立大型光伏电站的模型上,采用改进的混沌粒子群算法对光伏电站进行多目标无功优化,以均衡光伏电站站内节点电压,提高其稳定裕度,并降低有功网损为目标,仿真实验验证所提方法的正确性。通过求解向量组的极大线性无关组判断粒子的进化方向,有利于粒子保持多样性。

**关键词:** 大型光伏电站; 混沌粒子群算法; 无功功率; 秩; 极大线性无关组

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引言

截至2017年底,中国光伏发电累计装机容量130.25 GW,成为全球光伏发电装机容量最大的国家,其中,光伏电站100.59 GW。随着光伏发电装机容量的日益增大,光伏电站对电网的影响也日益增大<sup>[1-4]</sup>。大型光伏电站一般建在光照充足的荒漠地区,这些地区负荷较小,电网结构薄弱,电站电压稳定性较弱,造成光伏电站电压稳定问题突出<sup>[3]</sup>。受光照强度的变化,光伏电站的并网点电压会呈现波动变化,甚至有越限的可能性<sup>[5]</sup>,光伏电站并网点电压下降的主要原因是光伏电站无功功率不足<sup>[6,7]</sup>,所以大型光伏电站必须具备无功调节能力<sup>[8]</sup>。

目前大型光伏电站的无功控制仅有少数文献对其进行研究。文献[9]采用九区图对光伏电站并网点电压进行控制,文献[10]采用三层无功源对并网点电压进行控制,文献[11,12]对光伏电站参与配电网的无功优化。以上文献均将光伏电站看作一个整体,研究电站并网点电压和光伏电站参与配电网无功优化,忽略了光伏电站站内节点电压越限的可能性。由于光伏电站占地面积大,光伏发电单元

之间距离大,会造成光伏发电单元之间出口电压差较大,呈现出较大的时空分散特性,存在电压越限的可能性。所以对光伏电站内部进行无功优化,保证电站光伏发电单元出口电压不越限具有重要意义。

标准粒子群算法相比于其他算法而言具有算法简单、收敛速度快的特点<sup>[13]</sup>。但标准的粒子群算法易陷入局部最优,造成“早熟”现象。文献[14]将混沌映射加入粒子群算法,在算法后期保持了粒子多样性,但全部粒子进行混沌映射破坏了最优粒子及其附近的粒子向着最优解进化的趋势。文献[15]将粒子群算法与混沌优化结合,在3代适应值无变化时运用混沌优化。该方法中运用混沌优化的条件不具有充分性。文献[16]采用基于黄金分割的混沌粒子群算法对配电进行优化,该算法未提出粒子多样性的判断方法,且对每代的混沌粒子都要进行混沌映射,造成计算量大。

本文提出一种改进的粒子群算法,在算法中对粒子进行二进制编码,由二进制数值组成的向量组 $B$ 的秩 $R(B)$ 判断粒子多样性,通过求解向量组 $B$ 的极大无关组来确定粒子的进化方向,增加算法中粒子多样性,保证算法收敛到全局最优位置。

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 自然科学基金(51477021)

通信作者: 马卫(1990—),男,硕士研究生,主要从事光伏并网发电技术方面的研究。15825961021@163.com

# 1 大型光伏电站的拓扑结构和电压越限分析

## 1.1 大型光伏电站的拓扑结构

大型光伏电站多以逆变器集中并网的结构建立,采用变压器升压后高压远距离输电<sup>[17]</sup>。本文以国电蒙电巴彦淖尔市乌拉特后旗光伏发电项目为背景,图1所示为该光伏电站的拓扑结构。图1中,  $U_{ij}'$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ )表示光伏发电单元(PV generation unit, PVGU)的输出电压,  $T_{ij}$ 表示与光伏发电单元连接的升压变压器,  $U_{PCC}$ 是光伏电站并网点电压,  $U$ 表示电网电压。

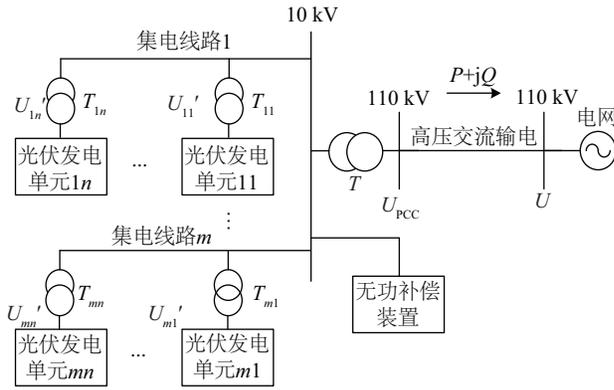


图1 大型光伏电站拓扑结构

Fig. 1 Topology of large-scale photovoltaic power plant

该大型光伏电站由40台PVGU并联组成,每组PVGU由2台500 kW的逆变器组成。光伏电站的电网阻抗建模如图2所示,为方便起见,用  $NODE_{ij}$ 表示光伏电站的节点,  $U_{ij}$ 表示  $NODE_{ij}$ 电压,  $Z_{Tij}$ 表示升压变压器阻抗,  $Z_l$ 表示PVGU之间的集

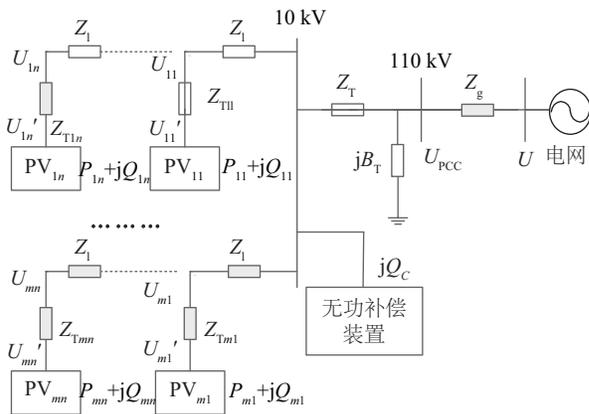


图2 大型光伏电站阻抗模型

Fig. 2 Impedance model of large-scale photovoltaic power plants

电线阻抗,  $Z_T$ 表示主变压器的阻抗,  $Z_g$ 表示高压交流输电线路的阻抗。PVGU输出电压270 V经输出变压器升压后达到10 kV,每条集电线路上并联10组PVGU,集电线路将光伏输出电能收集到主变压器,输出电能经过主变压器升压到110 kV后经过高压交流输电线路接入大电网。

## 1.2 光伏发电单元出力模型

光伏发电单元的出力受光照强度影响,光伏发电单元出力模型采用式(1)、式(2)<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} U_m' = U_m \ln \left[ e + 0.5 \left( \frac{S}{1000} - 1 \right) \right] \\ I_m' = I_m \frac{S}{S_{ref}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P = N_p U_m' I_m' \quad (2)$$

式中,  $U_m$ 、 $I_m$ ——光伏电池板在额定工况下的最大功率电压和最大功率电流;  $U_m'$ 、 $I_m'$ ——实际工况最大功率电压和电流;  $S$ ——实际光照强度;  $S_{ref}$ ——参考光照强度,取1000 W/m<sup>2</sup>;  $N_p$ ——每组PVGU所串并联的电池板数量;  $P$ ——PVGU输出有功功率;  $e$ ——自然常数。

## 1.3 光伏电站电压越限分析

大型光伏电站站内电压稳定性与集电线路上的参数有密切关系<sup>[3]</sup>。因为光伏电站每条集电线路上的情况类似,所以只分析第1条回路上的节点电压情况。通过图2的阻抗模型,可得到:

$$U_{li} = U_{l(i-1)} + \frac{\left( \sum_{j=i}^n P_{lj} - P_{loss} \right) R_l + \left( \sum_{j=i}^n Q_{lj} - Q_{loss} \right) X_l}{U_{l(i-1)}} \quad (3)$$

式中,  $R_l$ 、 $X_l$ ——PVGU<sub>li</sub>与PVGU<sub>l(i-1)</sub>之间集电线路上的电阻和电抗;  $P_{lj}$ 、 $Q_{lj}$ ——PVGU<sub>li</sub>发出的有功功率和无功功率;  $P_{loss}$ 、 $Q_{loss}$ ——在PVGU<sub>li</sub>与PVGU<sub>l(i-1)</sub>之前集电电路上损失的有功功率和无功功率。

光伏电站工作在单位功率因数并网时,通过式(3)可知,沿着节点号增大,节点电压会逐渐增大。另外,如果电网电压上升,使  $U_{PCC}$  电压升高,这样也会导致集电电路上节点电压升高,且集电线路末端电压最高,存在电压越上限可能性。另外,光照强度的变化也会引起并网点电压变化。所以,对光伏电站进行无功优化,保证站内电压不越限,稳定并网

点电压,具有重要的意义。

## 2 多目标无功优化的数学模型

### 2.1 目标函数

上文分析了集电线路节点上存在电压越限可能性,所以需对其进行无功优化,保证电站安全运行。将光伏电站节点电压差  $dv$  (包括并网点电压) 作为目标之一。光伏电站在有功输出增大时,并网点电压会呈现先上升后下降的趋势,其稳定裕度也会下降<sup>[19]</sup>,所以将光伏电站的稳定裕度也作为一个目标。电力系统的稳定裕度的指标可用雅克比矩阵的最小模特征值  $\lambda_{\min}$  来表示。考虑光伏电站的经济性运行,将电站站内的有功网损  $P_{\text{loss}}$  也作为目标之一。所以建立目标函数如下:

$$\min dv = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{U_{ij} - U_{ij}^*}{\Delta U_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{U_{\text{PCC}} - U_{\text{PCC}}^*}{\Delta U_{\max\_PCC}} \right)^2 \quad (4)$$

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{Z_l} (U_{i(j+1)}^2 + U_{ij}^2 - 2U_{i(j+1)}U_{ij} \cos \theta_{i(j+1),ij}) \quad (5)$$

$$\max \lambda_{\min} \quad (6)$$

式中,  $U_{ij}^*$  —— NODE<sub>*ij*</sub> 理想电压;  $\Delta U_{\max}$  —— 节点电压允许的最大偏差;  $U_{\text{PCC}}^*$  —— 光伏电站并网点理想电压;  $\Delta U_{\max\_PCC}$  —— 光伏电站并网点电压允许的最大偏差;  $\theta_{i(j+1),ij}$  —— NODE<sub>*i(j+1)*</sub> 与 NODE<sub>*ij*</sub> 之间的电压相角差。

### 2.2 功率约束方程

功率约束方程如下:

$$\begin{cases} P_{ij} = U_{ij} \sum_{u,v \in m,n} U_{uv} (G_{(ij)(uv)} \cos \theta_{(ij)(uv)} + B_{(ij)(uv)} \sin \theta_{(ij)(uv)}) \\ Q_{ij} = U_{ij} \sum_{u,v \in m,n} U_{uv} (G_{(ij)(uv)} \sin \theta_{(ij)(uv)} - B_{(ij)(uv)} \cos \theta_{(ij)(uv)}) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_{ij}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 发出的有功功率;  $Q_{ij}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 发出的无功功率;  $G_{(ij)(uv)}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 与 PVGU<sub>*uv*</sub> 之间电导;  $\theta_{(ij)(uv)}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 电压与 PVGU<sub>*uv*</sub> 电压之间的相角差;  $B_{(ij)(uv)}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 与 PVGU<sub>*uv*</sub> 之间电纳。

### 2.3 变量约束

无功优化约束可分为控制变量约束和状态变量约束。控制变量约束包括:逆变器无功输出量、无功补偿装置无功输出量、变压器分接头。其中前2项控制变量为连续变量,变压器分接头为离散变

量。状态变量约束包括:光伏电站节点电压。控制变量约束方程如下:

$$\begin{cases} Q_{ij\_min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij\_max} \\ Q_{\text{svc\_min}} \leq Q_{\text{svc}} \leq Q_{\text{svc\_max}} \\ k_{t\_min} \leq k_t \leq k_{t\_max} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $Q_{ij\_min}$ 、 $Q_{ij\_max}$  —— PVGU<sub>*ij*</sub> 的容性无功容量和感性无功容量;  $Q_{\text{svc\_min}}$ 、 $Q_{\text{svc\_max}}$  —— SVC 的容性无功容量和感性无功容量;  $k_{t\_min}$ 、 $k_{t\_max}$  —— 主变压分接头最低档位和最高档位。

状态变量约束方程如下:

$$U_{ij\_min} \leq U_{ij} \leq U_{ij\_max} \quad (9)$$

式中,  $U_{ij\_min}$ 、 $U_{ij\_max}$  —— 光伏电站中 NODE<sub>*ij*</sub> 允许的最小、最大电压。

### 2.4 归一化处理

目前有的文献将多目标函数通过归一化处理,然后进行加权赋值。但归一化处理后的数据可能不在一个数量级,加权赋值后不能准确反映多目标权重比例。为解决此问题,本文采用聚类分析法,将不同量纲的多目标转换为在(0,1)范围内的无量纲目标。

转换规则如下:

$$\begin{cases} dv^* = \frac{dv - dv_{\min}}{dv_{\max} - dv_{\min}} \\ P_{\text{loss}}^* = \frac{P_{\text{loss}} - P_{\text{loss\_min}}}{P_{\text{loss\_max}} - P_{\text{loss\_min}}} \\ \lambda_{\min}^* = \frac{\lambda_{\min\_max} - \lambda_{\min\_min}}{\lambda_{\min} - \lambda_{\min\_min}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $dv_{\min}$ 、 $P_{\text{loss\_min}}$ 、 $\lambda_{\min\_max}$  —— 站内电压偏差、有功损耗和电站稳定裕度优化过后的值;  $dv_{\max}$ 、 $P_{\text{loss\_max}}$ 、 $\lambda_{\min\_min}$  —— 站内节点电压偏差、有功损耗、电站稳定裕度的最差值。其中电站节点电压(电压等级为 10 kV)的范围为 1.07~0.93 pu,有功损耗最多、电站稳定裕度最小在光照强度最强时,电站稳定裕度最大是光伏电站  $P$  (有功功率)– $U$  (并网点电压)曲线顶点时<sup>[19]</sup>。

经过归一化处理过后的目标函数可描述如下:

$$\min f(x) = c_1 dv^* + c_2 P_{\text{loss}}^* + c_3 1/\lambda_{\min}^* \quad (11)$$

式(11)中3个变量的  $dv^*$ 、 $P_{\text{loss}}^*$ 、 $1/\lambda_{\min}^*$  变化范围为(0,1),有利于加权比较。在本文中取  $c_1=0.5$ ,  $c_2=0.25$ ,  $c_3=0.25$ 。

## 3 改进的混沌粒子群算法

### 3.1 粒子群算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种模仿鸟寻找食物的过程从而达到优化目的算法。在 PSO 中, 每个粒子都是解空间里的一个解, 每个粒子是  $D$  维变量,  $D$  是优化问题中变量个数。

设优化问题是:

$$\begin{cases} \min f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_D) \\ \text{s.t. } x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, \quad i = 1, 2, \dots, D \end{cases} \quad (12)$$

设第  $i$  个粒子  $P_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ , 它在迭代过程中产生的最优的适应值 (目标函数值) 为  $P_{\text{best}i} = (p_{\text{best}i1}, p_{\text{best}i2}, \dots, p_{\text{best}iD})$ 。在经过多次迭代过程中, 会在每代中产生最优粒子  $G_{\text{best}} = (g_{\text{best}1}, g_{\text{best}2}, \dots, g_{\text{best}D})$ 。标准粒子群算法的迭代公式为:

$$\begin{cases} v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}ij}^k - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\omega$  —— 惯性因子;  $x_{ij}^k$  —— 第  $i$  个粒子的第  $j$  维变量;  $v_{ij}^k$  —— 第  $i$  个粒子的第  $j$  维速度;  $c_1$ 、 $c_2$  —— 加速系数;  $r_1$ 、 $r_2$  ——  $(0, 1)$  之间的随机数。

### 3.2 混沌映射

混沌系统中的 Logistic 映射的定义为<sup>[20]</sup>:

$$z_{i+1} = \mu z_i (1 - z_i) \quad (14)$$

式中,  $\mu \in [3.57, 4]$ ,  $z_i \in (0, 1)$  并且  $z_i$  不取 0.25, 0.5, 0.75 时, 经过混沌映射后的  $z_i$  序列遍历  $(0, 1)$ 。

混沌变量  $x_i$  映射到混沌序列  $z_i$  的公式为:

$$z_i = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (15)$$

生成的混沌序列  $z_i$  利用式 (16) 可生成混沌变量  $x_i$ 。

$$x_i = z_i (x_{i\max} - x_{i\min}) + x_{i\min} \quad (16)$$

采用 Logistic 映射对粒子群算法进行初始化, 得到混沌序列的粒子, 这样初始化粒子可遍及解空间, 有利于寻找最优解。

### 3.3 改进的混沌粒子群算法

由于粒子群算法的特点, 粒子会朝着目前最优粒子靠近, 这样导致在算法后期粒子的多样性丢失, 可能算法会陷入局部最优, 达不到最优化目的。在粒子群算法中增加混沌映射, 将粒子映射到解空间, 有利于保持粒子的多样性, 跳出局部最优

解。不过若在混沌粒子群算法的每次迭代过程中, 都会对每个粒子进行混沌映射, 导致全部粒子映射到解空间, 这样可能会破坏最优粒子及其附近的粒子向着最优解进化的趋势, 导致最优解丢失。

本文提出一种改进的混沌粒子群算法, 把粒子中每维值 (变量值) 与最优粒子该维值进行比较赋值 0 或 1, 得到每个粒子 (目前最优粒子除外) 的二进制码  $BIN_i$ , 对粒子  $P_i$  进行二进制编码规则如下:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\text{best}j}}{x_{\text{best}j}} \quad (17)$$

式中,  $x_{ij}$  —— 粒子  $P_i$  第  $j$  维度的数值;  $x_{\text{best}j}$  —— 最优粒子  $G_{\text{best}}$  第  $j$  维度的数值,  $i = 1, \dots, N-1$  (最优粒子对应序号除外, 默认最优粒子序号  $i = N$ )。

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} > T_{ij} \\ 0, & d_{ij} \leq T_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $T_{ij}$  —— 粒子  $P_i$  第  $j$  维变量的阈值。

由式 (17)、式 (18), 可得到每个粒子  $P_i$  (除最优粒子外) 的二进制编码  $BIN_i$ , 并将其组成向量组  $B$ 。

$$BIN_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iD}) \quad (19)$$

$$B = \begin{pmatrix} BIN_1 \\ BIN_2 \\ \vdots \\ BIN_{N-1} \end{pmatrix} \quad (20)$$

在算法的初期, 粒子具有多样性特征, 向量组  $B$  的秩  $R(B)$  较大, 接近  $N-1$ 。在算法进行到后期时, 粒子可能会聚集在一起, 某些粒子的二进制编码变得相等, 导致粒子多样性缺失, 使得向量组  $BIN_1, BIN_2, \dots, BIN_{N-1}$  线性相关, 向量组  $B$  的秩小于  $N-1$ 。所以, 可通过设定向量组  $B$  秩的阈值  $\text{thr}(B)$  判断粒子多样性, 并通过初等行变换求解向量组  $B$  的极大线性无关组, 极大线性无关组对应的粒子具有多样性, 继续按照粒子群算法进化。其余粒子进入混沌变换, 保持粒子多样性。

### 3.4 算法步骤

1) 输入算法参数, 光伏电站站内节点信息。

2) 通过混沌初始化产生初始化序列:

a) 在区间  $(0, 1)$  中随机产生  $1 \times D$  个随机矩阵作为  $P_i$ ;

b) 对  $P_i$  中每个数采用式 (14) 产生混沌序列, 得到  $N$  个初始化粒子;

c)通过式(16)将混沌空间映射到解空间;

3)计算粒子  $P_i$  的二进制编码  $BIN_i$ 。

4)计算向量组  $B$  的秩  $R(B)$ 。

5)若  $R(B) < \text{thr}(B)$ , 则对向量组  $B_T$  进行初等行变换, 求出极大线性无关组, 其对应的粒子按照式(13)进行迭代计算, 其余粒子进入混沌变换。

6)通过潮流计算得到每个粒子的适应值, 并得到个体最优粒子  $P_{\text{best}}$  和全局最优粒子  $G_{\text{best}}$ 。

7)判断是否达到迭代次数或最优粒子满足预定的最小适应阈值, 若满足条件, 则进行步骤 8)。若不满足条件, 则返回步骤 3)。

8)迭代结束, 输出结果。

## 4 算例仿真分析

对图 2 的光伏电站模型进行仿真。光伏电站的装机容量为 40 MW, 由 4 条集电线路构成, 每条集电电路上并联 10 组光伏发电单元, 每组光伏发电单元的容量为 1 MW, 相邻的光伏发电单元间距 1.2 km, 连接光伏发电单元的集电线路采用型号为 YJV23-8.7/10、 $3 \times 150 \text{ mm}^2$  的电缆连接。光伏电站的主变压器的容量为 60 MVA, 输电线路为采用型号为 LGJ-400 的架空线, 长度 120 km。SVG 容量为  $-6 \sim 6 \text{ Mvar}$ 。

在 Matlab 环境下编写标准 PSO 程序和 CPSO 程序以验证所提方法的正确性, 程序的种群数为 40, 最大迭代数为 100 次  $R(B)$  为 35。潮流计算采用牛顿—拉夫逊迭代。

考虑到智能算法的计算时间、假设光照强度缓慢变化且无云层遮挡现象, 每隔 1 小时读取当地光照强度进行无功优化计算, 得出逆变器和无功补偿装置的无功值和变压器分接头的档位, 从而控制逆变器无功量输出和变换变压器分接头, 进而达到均衡站内节点电压, 降低有功损耗和提高电站稳定裕度的目的。以某地区某日光照曲线为例, 如图 3 所示。从 9:00 开始, 取每隔 1 小时的光照强度, 按照式(1)、式(2)计算光伏发电单元有功出力, 并计算系统潮流, 得到并网点电压, 各组 PVGU 出口电压以及损耗, 电站稳定裕度情况, 并分别采用 PSO 算法和改进 CPSO 算法进行优化, 计算结果如下。

表 1 光照曲线图

Table 1 Solar irradiance curve

时刻	光照强度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	时刻	光照强度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
09:00	320	14:00	984
10:00	584	15:00	896
11:00	790	16:00	572
12:00	940	17:00	425
13:00	966	18:00	316

### 4.1 适应值与秩分析

由图 3 可知, 采用改进的 PSO 可找到更小的适应值, 相比 PSO 有更好的发掘最优值的能力。图 4 反映了在迭代过程中向量组  $B$  的秩的变化情况。在 PSO 算法中, 前 25 代  $R(B)$  接近粒子数 40, 粒子具有多样性特征, 大概在第 25 代后粒子开始聚集,  $R(B)$  开始大幅度降低, 粒子多样性丧失, 大量粒子

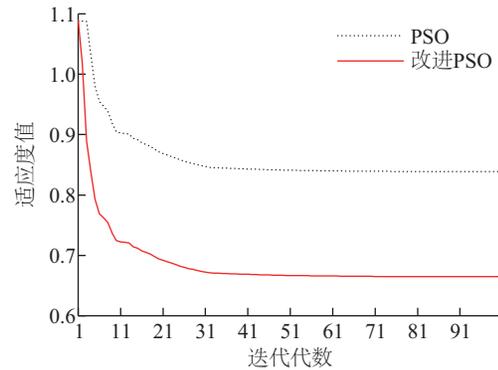


图 3 适应值图

Fig. 3 Adaptive value graph

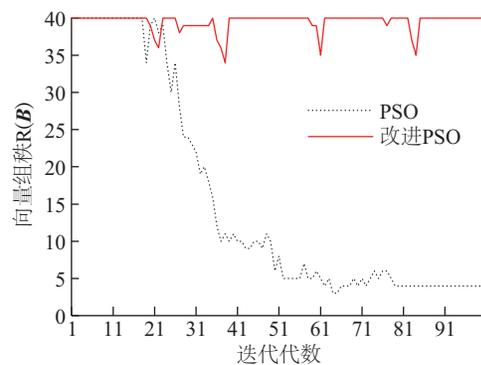


图 4 向量组  $B$  的秩  $R(B)$

Fig. 4 Rank of vector group  $B$

停留在局部最优解。在采用改进的 PSO 中, 在粒子开始聚集时,  $R(B)$  值开始减小, 当减小到 35

时,通过 3.3 节讲述的算法进行混沌映射,始终保持  $R(\mathbf{B})$  在 35 之上,保持粒子多样性,有利于找到最优解。

### 4.2 光伏电站并网点电压分析

从图 5 可看出,在未对光伏电站进行无功优化时,随着光照强度的增加并网点电压呈现出先升高后下降的趋势。在 10:00 时光伏电站存在越限的可能性。这是因为随着有功功率输出增大,光伏电站内部无功消耗增多,导致并网点电压下降。在对光伏电站进行无功优化后,并网点电压可约束在约 1.0 pu,且采用改进 CPSO 后,并网点电压相比 1.0 pu 更小,具有更好的抑制并网点电压波动的作用。

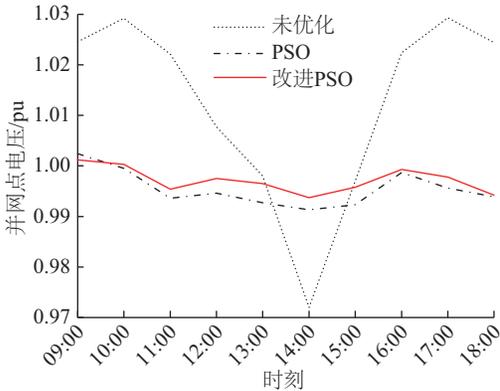


图5 光伏电站并网点电压

Fig. 5 PV network voltage of power plant

### 4.3 光伏电站站内节点最高电压分析

在图 6 中,未进行无功优化时,光伏电站站内

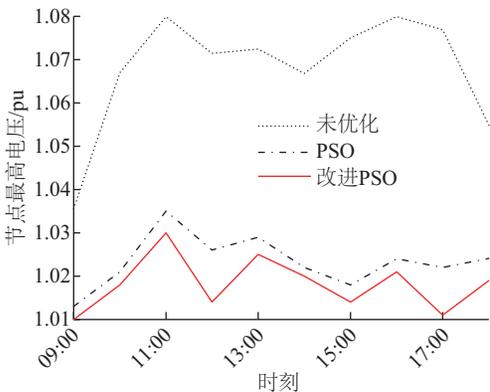


图6 光伏电站站内节点最高电压

Fig. 6 Highest voltage node of PV plant

节点最高电压接近 1.08 pu,会导致该节点的 PVGU

脱网,影响光伏电站的正常运行。在采用 PSO 算法和 CPSO 算法进行无功优化后,光伏电站站内节点最高电压限制在 1.04 pu 范围,降低了节点最高电压最高值,保证光伏电站正常运行。并且图 6 也可看出,CPSO 算法更多地降低了光伏电站站内最高电压,更好地保证了光伏电站内部节点电压不越限。

### 4.4 光伏电站稳定裕度分析

表 2 列出了不同时刻的潮流雅克比矩阵的最小模特征值  $\lambda_{\min}$ 。可看出,随着光照强度增大, $\lambda_{\min}$  呈现先变大后变小的变化趋势,在 14:00 时即光照强度最大时, $\lambda_{\min}$  最小。在运用 PSO 算法和 CPSO 算法后, $\lambda_{\min}$  有所提高,并且 CPSO 算法可更多地提高  $\lambda_{\min}$ 。

表2 雅克比矩阵模特征值最小值  
Table 2 Minimum ratio matrix of Jacques

时刻	未优化	PSO	CPSO
09:00	0.0268	0.0288	0.0289
10:00	0.0312	0.0315	0.0318
11:00	0.0309	0.0324	0.0322
12:00	0.0299	0.0305	0.0325
13:00	0.0245	0.0317	0.0322
14:00	0.0237	0.0312	0.0324
15:00	0.0287	0.0316	0.0327
16:00	0.0318	0.0335	0.0355
17:00	0.0321	0.0347	0.0356
18:00	0.0348	0.0357	0.0362

### 4.5 光伏电站站内线路有功损耗分析

表 3 是光伏电站内部线路有功损耗相关数据。由表 3 可知,在光照强度较弱时,PSO 和 CPSO 算法会使得光伏电站有功损耗略微增加,这是因为逆变器发出较少的无功功率导致,此时电站内部集电线路和变压器等仍需从电网吸收无功功率。随着光照强度增加,逆变器发出无功较多,可补偿电站内部的无功需求,电站内部无需从电网吸收无功功率,有功损耗较低。且 CPSO 可比 PSO 算法更好地降低电站内部有功网损。

表3 光伏电站站内线路有功损耗

Table 3 Line power loss of PV plant station

时刻	光照强度/ $W \cdot m^{-2}$	有功损耗/MW		
		未优化	PSO	CPSO
09:00	320	0.383	0.390	0.388
10:00	584	1.162	1.166	1.198
11:00	790	2.059	2.057	2.054
12:00	940	3.080	2.994	2.986
13:00	966	3.506	3.476	3.384
14:00	984	3.701	3.640	3.432
15:00	896	2.762	2.703	2.661
16:00	572	2.031	2.030	2.024
17:00	425	1.153	1.166	1.163
18:00	316	0.374	0.401	0.379

## 5 结 论

本文给出对陷入局部最优值的粒子的判断方法。采用对粒子进行二进制编码,通过求解向量组  $B$  的秩来判断粒子的多样性,并且通过求解极大线性无关组选择粒子的进化算法。既保持了粒子向着全局最优移动的趋势,也保证了粒子的多样性,有利于算法找到全局最优值。光照强度的变化不仅会影响并网点电压波动,也可能使电站内部节点电压越限。利用改进的混沌粒子群算法对白天内光伏电站站内进行无功优化,以光伏电站站内有功损耗、节点电压和电站稳定性作为优化目标。仿真验证结果表明改进的混沌粒子群算法可更好地降低有功损耗,均衡节点电压和增强电站稳定性。在考虑光照强度变化不大的情况下,利用仿真得到的结果,对光伏电站进行无功优化,有利于光伏电站安全稳定运行。

### [参考文献]

- [1] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101—107.
- [1] Zhao Zhengming, Lei Yi, He Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101—107.
- [2] 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.

- [2] Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1—14.
- [3] 周林,张密,居秀丽,等. 电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 34—41.
- [3] Zhou Lin, Zhang Mi, Ju Xiuli, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic plants due to grid impedances [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 34—41.
- [4] Du Yan, Su Jianhui, Mao Meiqin, et al. Autonomous controller based on synchronous generator dq0 model for micro grid inverters[A]. 8th International Conference on Power Electronics [C], Jeju, South Korea, 2011, 2645—2649.
- [5] 裴玮,孔力,齐智平. 光伏发电参与配电网电压调节的控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1629—1635.
- [5] Pei Wei, Kong Li, Qi Zhiping. Cooperatative voltage regulation strategy in distribution network with high penetration level of PV generations[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1629—1635.
- [6] Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, He Guoqing, et al. Modeling of large grid-Integrated PV station and analysis its impact on grid voltage [A]. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply [C], Nanjing, China, 2009, 1—6.
- [7] Kabiri R, Holmes D G, Mcgrath B P, et al. The influence of PV inverter reactive power injection on grid voltage regulation [A]. Power Electronics for Distributed Generation Systems [C], Galway, Ireland, 2014, 1—8.
- [8] Q/GDW 617—2011, 光伏电站接入电网技术规定[S].
- [8] Q/GDW 617—2011, Technical for photovoltaic power station connected to power grid[S].
- [9] 葛虎,毕锐,徐志成,等. 大型光伏电站无功电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 45—51.
- [9] Ge Hu, Bi Rui, Xu Zhicheng, et al. Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 45—51.

- [10] 晁 阳. 并网光伏发电系统无功电压控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014, 37—39.
- [10] Chao Yang. The research of reactive power and voltage control for grid-connected photovoltaic generating systems [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014, 37—39.
- [11] 郭 康, 徐玉琴, 张 丽, 等. 计及光伏电站随机出力的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 53—58.
- [11] Guo Kang, Xu Yuqin, Zhang Li, et al. Reactive power optimization of distribution network considering PV station random output [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 53—58.
- [12] 张 璐, 唐 巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525—5533.
- [12] Zhang Lu, Tang Wei, Cong Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (31) : 5525—5533.
- [13] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33(6): 20—24.
- [13] Ding Yufeng, Wen Jinyu. Advanced PSO algorithm of reactive power optimization in power system [J]. Relay, 2005, 33(6): 20—24.
- [14] 李 娟, 杨 琳, 刘金龙, 等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26—31.
- [14] Li Juan, Yang Lin, Liu Jinlong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 26—31.
- [15] 刘丽军, 李 捷, 蔡金锭. 基于强引导粒子群与混沌优化的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 71—75.
- [15] Liu Lijun, Li Jie, Cai Jinding. Reactive power optimization based on induction-enhanced particle swarm optimization and chaos search [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 71—75.
- [16] 汪 超, 王 昕, 姚 钢, 等. 基于黄金分割的混沌粒子群优化算法在配电网无功规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 31—36.
- [16] Wang Chao, Wang Xin, Yao Gang, et al. Application of golden section based chaos particle swarm optimization algorithm in distribution network reactive power optimization [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 31—36.
- [17] Inzunza R, Sumiya T, Fujii Y, et al. Parallel connection of grid-connected LCL inverters for MW-scaled photovoltaic systems [A]. Proceedings of IEEE International Power Electronics Conference [C], Sapporo, Japan, 2010, 1988—1993.
- [18] 傅 望, 周 林, 郭 珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 10(9): 211—216.
- [18] Fu Wang, Zhou Lin, Guo Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 10(9): 211—216.
- [19] 杜 潇, 周 林, 郭 珂, 等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3427—3434.
- [19] Du Xiao, Zhou Lin, Guo Ke, et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3427—3434.
- [20] 黄席樾, 向长城, 殷礼胜. 现代智能算法理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] Huang Xiyue, Xiang Changcheng, Yin Lisheng. Theory and application of modern intelligent algorithms [M]. Beijing: Science Press, 2009.

## REACTIVE POWER OPTIMIZATION OF PV POWER PLANT STATION BASED ON CHAOS-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Ma Wei<sup>1</sup>, Zhou Lin<sup>1</sup>, Wang Yihuan<sup>2</sup>, Shao Nianbin<sup>3</sup>, Hao Gaofeng<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University)*,  
Chongqing 400044, China; 2. *State Grid Sichuan Electric Power Company Pixian Power Supply Branch Company*,  
Chengdu 611730, China; 3. *East China Electric Power Design Institute*, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The large photovoltaic power station is composed of a plurality of groups of photovoltaic generating units in parallel. Illumination of light intensity will not only cause the PCC voltage fluctuation, but also may cause the voltage of the photovoltaic power generation unit exit the limit, showing a large space and time dispersion characteristics. And with the increase of active power output, and the stability of photovoltaic power plants will decline. Aiming at balancing the node voltage of photovoltaic power station, improving the stability margin and reducing the active power loss, multi objective reactive power optimization is applied by improved chaos particle swarm optimization algorithm in photovoltaic power plant, basing on the model of large scale photovoltaic power station. Finally, the correctness of the proposed method is verified by simulation. In this paper, the evolution direction of the particle is judged by the maximal linear independent group of the vector group, which is beneficial to the diversity of the particle.

**Keywords:** large-scale photovoltaic power plants; Chaotic Particle Swarm Optimization; reactive power; rank; maximal linearly independent system