

基于改进鱼群算法的大型光伏电站无功优化

文/输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 周林 马卫 邵念彬 杜潇

随着化石能源日益枯竭,环境问题日益严重,光伏发电越来越引起人们的重视,并得到了国家的大力支持。《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》中指出,到2020年,我国非化石能源占一次能源消费比将达到15%,其中光伏装机达到1亿kW左右,光伏发电与电网销售电价相当。根据国家能源局统计数据显示,截止到2014年底,我国光伏发电累计并网装机容量2 805万kW,其中光伏电站2 338万kW,分布式467万kW。可见,光伏电站的大型化和规模化已成为光伏产业的发展趋势。大型光伏电站多建立在荒漠化边远地区,所接入地区电网短路容量较小,大量的光伏电力需要高压长距离输电线路接入电网,光伏出力的波动性和随机性会导致光伏电站并网点电压的波动,影响电网的稳定运行,因此大型光伏电站必须具备无功电压控制能力。

受到资源密度和能量分布的制约,大型光伏电站通常由多组光伏发电单元(PV Generation

Unit, PVGU) 并联组成。各组PVGU之间通过集电线路连接。目前针对大型光伏电站的研究都将电站等效为PQ节点,采用定电压控制或分区图的控制方式控制并网点电压,但未考虑电站内部集电线路和升压变压器的影响。实际上,受集电线路输送功率和电气距离的影响,各PVGU出口电压呈现较大的时空分散特性,光照的变化不仅会造成并网点电压波动,也可能导致电站内部电压剧烈变化,不利于保护装置的整定,严重时导致逆变器脱网,因此有必要对光伏电站内部电压进行优化。

本文建立了考虑站内集电线路,升压变压器,输电线路阻抗的光伏电站稳态运行模型,在此基础上提出了并网点电压偏差最小,各组PVGU出口电压偏差最小以及电站动态无功容量最大的优化模型,并采用改进人工鱼群算法(Improved Artificial Fish Swarm Algorithm, IAFSA)进行求解,最后通过仿真算例,验证了算法的正确性和有效性。

光伏电站建模

1. 光伏出力模型

光伏阵列由电池板串并联组成,光伏电池的 $U-I$ 特性体现为很强的非线性,一般采用以下工程用数学模型进行表示

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

其中

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}} \\ C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

U_m 、 I_m 、 U_{oc} 、 I_{sc} 分别为电池板额定工况下最大工作点电压、最大工作点电流、开路电压以及短路电流,由厂家给出。而在实际应用中这些参数受到光照强度以及温度的影响,需要按照以下公式进行补偿

$$\begin{cases} U'_m = U_m [1 - 0.00288(T - 25)] \ln \left[e + 0.5 \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) \right] \\ I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} [1 + 0.0025(T - 25)] \\ U'_{oc} = U_{oc} [1 - 0.00288(T - 25)] \ln \left[e + 0.5 \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) \right] \\ I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + 0.0025(T - 25)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, U'_m 、 I'_m 、 U'_{oc} 、 I'_{sc} 分别为实际工况下的最大功率点电压、最大功率点电流、电流、开路电压和短路电流; S 为实际太阳辐照度、 S_{ref} 为参考光照强度,取1 000 W/m²; e 为自然对数。将式(3)中各参数带入式(1),即可得到不同光照强度和温度下的光伏电池板输出特性。

在实际应用中,光伏逆变器多工作在最大功率跟踪模式下,在本文的分析中,需将每组光伏发电单元等效为PQ节点进行潮流计算,因此可以假设电池板工作在最大功率点处,忽略逆变器动态过程的影响,光伏阵列输出功率可表示如下

$$P_{pv} = N_p U'_m I'_m \quad (4)$$

N_p 为每组PVGU所串并联的电池板个数,考虑到逆变器损耗,每组光伏发电单元的有功出力可用下式表示为

$$P = \eta N_p U'_m I'_m \quad (5)$$

η 为逆变器效率。

2. 光伏电站模型

大型光伏电站多采用逆变器并联集中并网,通过升压站变压器实现高压交流输电。以国内某大型光伏电站为例,其拓扑结构如图1所示。

图中 U_i 表示第 i 组PVGU升压变压器低压侧电压, U_{POI} 表示主变压器高压侧(并网点)电压。 U 表示电网电压。无功补偿装置(SVG)装设在主变压器低压侧。

PVGU由若干逆变器并联组成,可将直流电能逆变为270 V交流电;为减小电站内部损耗,每组PVGU配置1台0.27 kV/10 kV升压变压器(T_i)。由于光伏阵列占地面积较大,各组PVGU之间距离较远,需要 m 回集电线路(每回集电线路串联 i 组光伏发电单元)将电能汇集,接入主变压器(T)低压侧,由

主变压器将电能集中升压至110 kV,通过送出线路输送至电网。

建立图1等值模型,如图2所示。由于逆变器可实现独立无功控制,可以将PVGU等效为PQ节点。为简化分析,忽略PVGU升压变压器激磁导纳。图中 $P_i + jQ_i$ 表示第 i 组PVGU所发出功率, Z_{Ti} 表示第 i 组PVGU与第 $i-1$ 组PVGU之间的线路阻抗, Z_{Ti} 表示第 i 组PVGU的升压变压器的等效阻抗, Z_g 、 B_g 为输电线路的阻抗和导纳。 U_{i1} 与 U_{i2} 表示第 i 组升压变压器低压侧电压和高压侧电压。 U_{2POI} 表示主变压器低压侧电压。

通过牛顿-拉夫逊迭代算法对该模型求解,可以得到不同光照条件下,各个节点的电压的详细情况。

多目标优化模型

1. 优化目标

优化目标1:并网点电压最靠近额定值。

$$\min f_1 = |U_{POI} - 1| \quad (6)$$

U_{POI} 为光伏电站并网点实际电压(以下计算均以标幺值表示)。

优化目标2:各PVGU出口电压平均偏差最小。

通过调节PVGU的无功输出及其升压变压器变压器分接头,使得站内各PVGU出口电压均匀分布,远离保护装置动作阈值。

$$\min f_2 = \sum_{n=1}^N |U_n - U_{ref}| \quad (7)$$

N 为站内PVGU组数, U_n 为第 n 组PVGU出口实际电压, U_{ref} 为电压参考。

优化目标3:动态无功储备最大

$$\max f_3 = Q_{SVG} \quad (8)$$

相比于大容量无功补偿装置,逆变器分布分散,当电压发生故障时无法快速提供足够的无功输出;因此,在稳态时优先利用逆变器进行调压,保证SVG有足够的无功裕量,在电网发生故障时提供快速无功支撑。

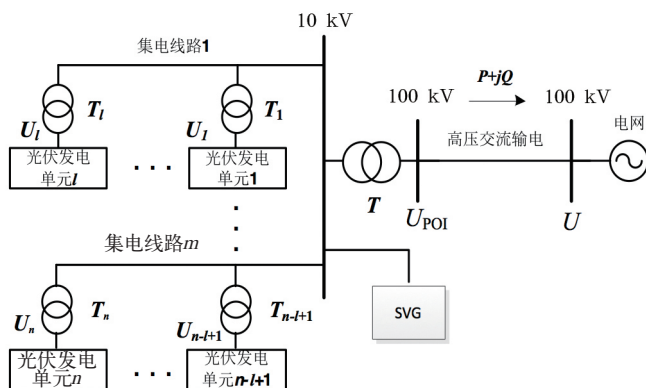


图1 大型光伏电站拓扑结构示意图

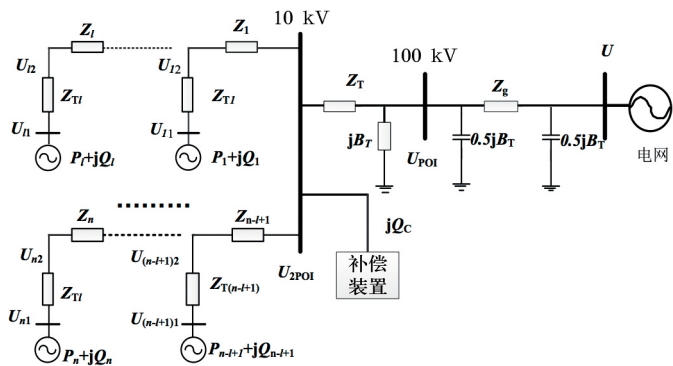


图2 大型光伏电站等值模型

2. 控制变量及约束条件

根据《光伏电站无功补偿技术规范》GB/T 29321-2012规定,大型光伏电站应设置动态无功补偿装置,通过调节逆变器、无功补偿装置的无功输出以及主变压器分接头实现并网点电压的调节。考虑到光伏发电单元升压变压器也具有载调压能力,因此控制变量包括各组PVGU无功输出 Q_i ,无功补偿装置无功输出 Q_C ,主变压器分接头 T_{POI} 以及各组PVGU升压变压器分接头 T_i 。其中前两者为连续变量,后两者为离散变量,且受到以下不等式约束为

$$\begin{cases} Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \\ Q_{C\min} \leq Q_C \leq Q_{C\max} \\ T_{POI\min} \leq T_{POI} \leq T_{POI\max} \\ T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \end{cases} \quad (9)$$

$Q_{i\min}$ 、 $Q_{C\min}$ 、 $Q_{i\max}$ 、 $Q_{C\max}$ 分别为第*i*组PVGU和无功补偿装置的容性无功容量和感性无功容量; $T_{POI\min}$ 、 $T_{i\min}$ 、 $T_{POI\max}$ 、 $T_{i\max}$ 分别为主变压器以及第*i*组PVGU升压变压器的分接头最小档位和最大档位。

等式约束为功率平衡方程。

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Li} &= U_i \sum_{j=1}^{N_{node}} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} &= U_i \sum_{j=1}^{N_{node}} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (10)$$

P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为节点*i*出的有功注入和无功注入; P_{Li} 、 Q_{Li} 为节点*i*处负荷的有功功率和无功功率; N_{node} 为总的节点数; U_i 、 U_j 为节点*i*、*j*处的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 为支路*i-j*的电导、电纳及电压相角差。

3. 多目标模糊处理

通过对上述目标模型直接求解,可以求得Pareto最优解集,但从Pareto最优解集选择满意的解比较困难,本文拟采用权重系数法将多目标问题转化为单目标问题。由于不同的优化目标值有很大差异,采用直接加权的方式不利于搜索到

满意解,本文依据模糊理论将优化目标模糊化,隶属度函数如下

$$Mf_i(X) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \leq f_i^{\min} \\ 0 & f_i(X) \geq f_i^{\max} \\ \frac{1/f_i(X) - 1/f_i^{\max}}{1/f_i^{\min} - 1/f_i^{\max}} & f_i^{\min} \leq f_i(X) \leq f_i^{\max} (i=1, 2) \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(X) \leq f_i^{\max} (i=1, 2) \end{cases} \quad (11)$$

X 为控制变量, $f_i(X)$ 为第*i*个优化目标函数值, $f_{i\max}$ 、 $f_{i\min}$ 分别为第*i*个优化目标的最大值和最小值。通过模糊处理,可以将优化目标处理为0到1的值,对于优化目标2,分别各个PVGU出口电压偏差的模糊值,将其总的平均值作为最终优化目标。最后通过加权,将多目标优化转化为单目标问题。

$$\begin{cases} \mu(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_i Mf_i \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中 λ_i 为第*i*个优化目标的权重系数,可以根据决策者的实际需要,调节不同优化目标优先级。

改进人工鱼群算法

1. 人工鱼群算法简介

人工鱼群算法是李晓磊等人于2002年提出的基于动物行为群体智能优化算法,具有鲁棒性强,全局收敛性好,不依赖问题的具体类型,对初值不敏感等特点,在生产实践中得到了广泛的应用。该算法通过模拟鱼类觅食、聚集、追尾等行为搜索最优解。用控制变量 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示人工鱼的位置,目标函数值表示环境中实物的浓度 Y ,当求最大值时,目标函数值越大,则食物浓度越大。因此,在本文的优化问题中,人工鱼的各个行为可表示如下。

觅食行为:第*i*个人工鱼在其视

野 V 范围内进行巡视,当巡视点 X_v 处的食物浓度大于当前位置 X_i 处的食物浓度时,则向着该巡视点移动一步,到达新的位置 X_{next} 。当巡视点 X_v 处的食物浓度不大于当前位置时,则巡视下一点。

$$\begin{cases} X_v = X_i + Vr \\ X_{next} = X_i + \frac{X_v - X_i}{\|X_v - X_i\|} \text{step}r \end{cases} \quad (13)$$

其中 r 为随机数,step为设定步长。当达到最大巡视数仍未找到更优位置时,则随机移动一步,即执行随机行为

$$X_{next} = X_i + \text{step}r \quad (14)$$

聚集行为:要求人工鱼向周围伙伴中心移动,且避免过分拥挤。设人工与当前位置为 X_i ,探索视野 V 范围内的同伴数量 n_f ,并计算中心位置 XC 的食物浓度 Y_C ,当 $Y_C/n_f > \delta Y_i$ 时,向中心移动一步。 δ 为拥挤度因子。

$$X_{next} = X_i + \frac{X_C - X_i}{\|X_C - X_i\|} \text{step}r \quad (15)$$

当 $Y_C/n_f \leq \delta Y_i$ 时,执行觅食行为。

追尾行为:体现为追逐邻域内食物浓度最高的个体。设第*i*个个体当前位置为 X_i ,探索邻域内($d < V$) Y_j 为最大值的个体 X_j ,若 $Y_j/n_f > \delta Y_i$,表明个体*j*周围食物浓度较高,且周围不太拥挤,则向*j*个体前进一步,否则执行觅食行为。

$$X_i = X_i + \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \text{step}r \quad (16)$$

人工鱼分别执行聚集行为和追尾行为,比较两种行为的结果,取最优者作为下一步的移动方向。

公告牌:用以记录最优人工鱼的位置 X_{best} 和适应度 Y_{best} ,每条人工鱼行动完毕后将自身的状态与公告牌比较,若由于公告牌,则将公告牌内容改写为自身的状态。

2. 改进鱼群算法

由于人工鱼算法在算法后期易陷入局部最优,出现进化停滞现象,因此本文提出以下两点改进。

自适应步长:步长Step决定了人工鱼的移动范围和速度,Step越大,移动范围越大,算法探索能力越强,但易错过最优解,精度较差;Step越小,移动范围越小,算法具有较强的挖掘能力,但收敛速度较快,易陷入局部最优。为平衡算法的探索和挖掘能力,按照下式自适应调整步长的大小。其中 t 为迭代次数, $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

$$\text{Step}(t) = \text{Step}_{\min} + \frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} (\text{Step}_{\max} - \text{Step}_{\min}) \quad (17)$$

精英学习策略:人工鱼通过探索其视野范围内的食物浓度或者同伴中心浓度来寻优,具有较强的邻域搜索能力,全局搜索能力较弱,为增强算法的全局探索能力,提出精英学习策略,使得人工鱼按照一定的概率向公告牌中的全局最优个体的方向移动。具体策略为:人工鱼首先执行追尾行为和聚群行为,当无法找到比当前行为更优的解时,以概率 $1-P$ 执行学习策略,移动步长如下

$$X_{\text{next}} = X + (X_{\text{best}} - X)r \quad (18)$$

P 为执行觅食行为概率, X 为当前位置, X_{next} 为下一步的目标位置。

在算法开始时,算法具有较大的概率执行随机行为,增加种群的多样性,在算法后期,执行学习行为的概率逐渐增大。 α 为调整系数, $\alpha < 1$ 。

$$P(t+1) = \alpha P(t) \quad (19)$$

3. 算法步骤

1) 参数初始化,确定人工鱼个数,视野,步长,最大巡视次数等优化算法参数,以及光照强度,系统线路参数等潮流算法参数。

2) 计算所有人工鱼的适应度值,将最优人工鱼位置及适应度记

入公告牌。

3) 人工鱼分别执行追尾行为和聚群行为,并分别对其结果进行评价,若最优值优于当前位置,取最优者作为下一步的移动方向,然后转向步骤5),否则执行步骤4)。

4) 产生随机数rand,若 $\text{rand} < P(t)$,则执行觅食行为,否则执行学习行为。

5) 评价所有人工鱼的适应度,更新公告牌。

6) 满足终止条件则算法终止,否则执行下一步。

7) 更新学习概率和步长,返回步骤3)。

算例仿真

本文以图3所示光伏电站为研究对象,对所提算法进行验证。

光伏电站总装机容量60MW,共有4回集电线路,每回集电线路串联10组PVGU,每组PVGU容量1.5 MW(为便于计算,采用1台1.5 MW逆变器,逆变效率98%),通过 $10 \pm 2 \times 2.5/0.27$ kV升压变压器升压至10 kV接入集电线路。相邻两组PVGU之间距离为1.2 km,选用YJV23-8.7/10、 3×150 mm²电缆连接。主变压器容量60MW,变压比 $121 \pm 8 \times 1.25\%/10.5$ kV。送出线路长度80 km,采用LGJ185型号导线。SVG容量为-6 Mvar-6 Mvar。

在matlab环境下编写潮流计算程序以及改进的人工鱼群算法程序(IAFSA)程序;潮流计算采用牛顿-拉夫逊迭代;IAFSA算法中种群规模为50,最大迭代次数200次;最大巡视次数取10。优化目标权重系数 λ_1 , λ_2 , λ_3 分别取0.4, 0.4, 0.2; α 取0.7, $\text{step}_{\max}$ 取0.6, $\text{step}_{\min}$ 取0.2,鉴于各条集电线路结构相同,为减小算法的复杂度,假设处于不同集电线路中同一位置的光伏发电单元具有相同的无功出力,以及相同的升压变压器分接头位置(例如PVGU₁₁, PVGU₂₁, PVGU₃₁, PVGU₄₁控制变量为都 Q_1 , T_1)。因此在本文中控制变量包括逆变器无功输出($Q_1 \sim Q_{10}$),升压变压器分接头位置($T_1 \sim T_{10}$),SVG无功输出 Q_{SVG} ,升压变压器分接头位置 T_{POI} 。分别在光照强度为200 W/m², 600 W/m², 900 W/m²情况下,按照前面计算光伏有功功率,并计算系统潮流,得到并网点电压,内部电压分布以及SVG剩余容量,并采用IAFSA算法进行优化,计算结果如下。

表1为并网点电压情况,在优化前,并网点电压随着有功出力的增加呈现先上升后下降的趋势,这是因为随着有功输出的增加,光伏电站内部感性无功消耗逐渐上升,另外送出线路逐渐由容性呈现为感性,送出线路中

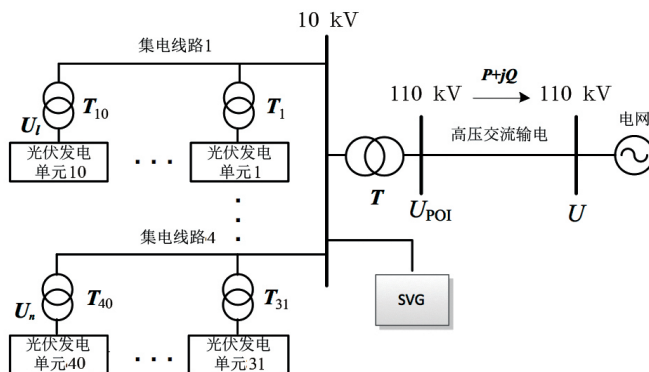


图3 仿真电路图

逆向无功功率的影响逐渐大于有功功率。优化后，IAFSA算法能够将并网点电压优化到额定值附近，且优化后，SVG有足够的无功裕量。

图4 显示的为优化前后某条集电线路各组PVGU并网点压情况，1号PVGU距离并网点最近，10号最远。优化前，各组PVGU并网电压随着到并网点距离的增加而增加，

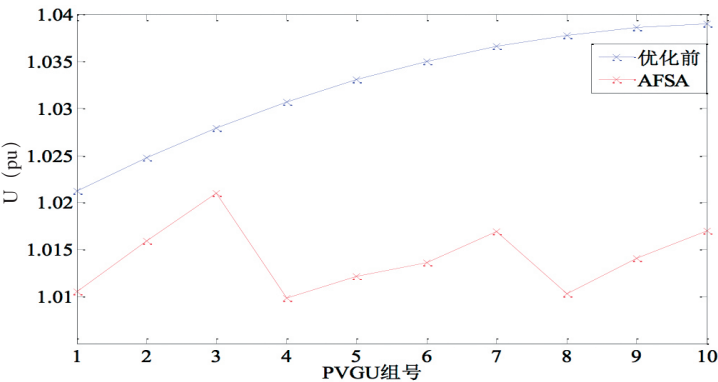
在 S 等于 600 W/m^2 时，电压最高值达到 1.08 pu ，易导致高压保护装置动作；且随着光照强度的增加，集电线路首末两端的光伏发电单元并网点压差逐渐增加，在光照强度为 900 W/m^2 时，首末两端电压差值达到 0.75 pu ，不利于保护装置的整定。

采用IAFSA优化后，各组PVGU并网点压都在 $1\sim 1.02\text{ pu}$ 范围内。可知该算法可大大改善电站内部的电压分布。

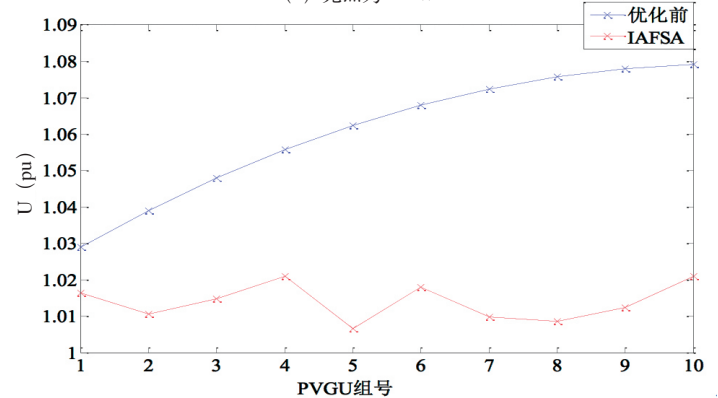
表2，表3分别为在IAFSA算法下各组PVGU的无功输出以及各组升压变压器的分接头位置情况。

表1 优化前后并网点电压以及SVG裕量

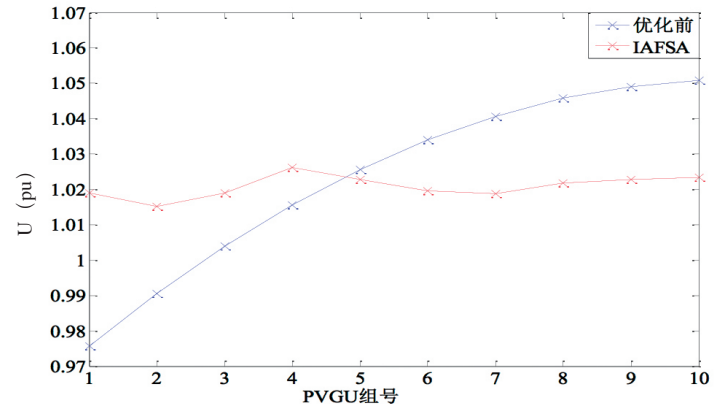
光照强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	并网点电压/ pu		优化后SVG剩余容量/ Mvar
	优化前	优化后	
200	1.026	1.001	4.03
600	1.034	1.013	3.92
900	0.979	1.005	5.99



(a) 光照为 200 W/m^2



(b) 光照为 600 W/m^2



(c) 光照为 900 W/m^2

图4 各光伏发电单元并网点电压

表2 各组PVGU无功出力

光照强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	各组PVGU无功出力/ kvar				
	1	2	3	4	5
200	391.2	406.4	433.3	107.5	100.7
600	192	288.4	301.4	289.3	155
900	445.1	581.7	-150.4	333.6	-64.4

光照强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	各组PVGU无功出力/ kvar				
	6	7	8	9	10
200	84.1	121.2	-55.4	10.6	65.9
600	2.1	-257.7	-341.4	-296.9	-126.2
900	-167.9	-305.6	-337.3	-382.5	-145.2

表3 各组PVGU升压变压器分接头位置

光照强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	各组升压变压器变压比				
	1	2	3	4	5
200	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
600	1	1.025	1.025	1.025	1.025
900	1	1.025	1	1.025	1.025

光照强度 /W·m ⁻²	各组升压变压器变压比					
	6	7	8	9	10	主变
200	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.05
600	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1
900	1.025	1.025	1.025	1.025	1.05	0.9875

结束语

光伏出力的波动不仅会导致并网点电压波动，也会影响站内电压的分布。本文采用改进鱼群算法对不同光照情况下光伏电站电压进行优化，并与PSO进行比较，结果表明，该方法能够明显改善并网点电压和站内电压分布，并且使得SVG保持足够的无功裕量。EA