[分布式发电]

# 基于分布式光伏冗余容量的配电网无功优化方法

文/王之茵[1] 李炜[2] 杨帆[3] 池文艺[3] 仉志华[3] 孙东[2] 林日亿[3]
1. 中国石油化工集团有限公司健康安全环保管理部；2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心；
3. 中国石油大学（华东）新能源学院

*构建以最小化网络损耗率为目标的无功优化模型，并提出一种结合Levy飞行与非线性惯性权重递减策略的改进粒子群优化算法（LNLPSO）进行求解。通过胜利油田孤东采油厂配电线路的算例验证，采用所提方法后，系统网络损耗率显著降低。结果表明，所提模型与算法在降低网络损耗、提升能源利用率方面具有良好的工程实用性。*

近年来，我国对可再生能源研究的重视程度持续增强，并不断加大投入力度，推动分布式光伏在配电网中的规模化应用呈现显著增长态势。分布式光伏逆变器本身具有快速的无功调节能力，能够动态追踪光伏有功输出功率的变化并实时调整无功出力。通过挖掘光伏逆变器的冗余容量进行无功调节，不仅可以支撑并网点电压稳定、降低配电网损耗率，还可以减少额外配置传统无功设备的投资成本。

随着新型电力系统的构建，高比例分布式光伏与储能设备接入配电网，导致系统潮流双向化、电压波动加剧，传统无功优化方法面临新的挑战。研究表明，光伏逆变器的多模式控制策略可有效抑制电压抬升问题（如恒功率因数控制、电压-无功下垂控制等）。针对分布式电源渗透率增加引发的电压越限问题，现有研究多采用光伏逆变器、变压器分接头与电容器组协同调控的策略。然而，当前研究仍存在以下不足。

1）现有策略多受限于固定功率因数运行模式（如±0.95），仅能利用约31%的逆变器视在容量冗余，未能充分发挥其动态调节潜力。

2）夜间光伏停机时段的无功支撑问题长期被忽视，现有文献未提出有效解决方案。

3）传统优化算法（如标准粒子群算法）易陷入局部最优，难以满足高维非凸问题的求解需求。

针对上述问题，本文提出一种利用光伏逆变器全部冗余容量的配电网无功优化方法，核心创新包括：①突破固定功率因数限制，充分利用光伏逆变器的无功冗余容量；②通过控制策略升级，实现逆变器夜间SVG功能，填补无功支撑空白；③设计基于Levy飞行与非线性惯性权重的改进粒子群算法（LNLPSO），显著提升收敛速度与全局寻优能力。以中石化胜利油田孤东采油厂实际线路为案例，验证该方法所提策略可使平均网损率降低32%，可为类似场景提供经济高效的直接解决方案。

## 分布式光伏的无功输出能力分析

分布式光伏逆变器具备快速连续的无功调节能力，可以作为电力系统中无功电源发出无功。传统运行模式下，光伏逆变器通常以固定功率因数运行（如±0.95），导致其冗余容量未被充分利用。

光伏逆变器虽具有快速的无功调节能力，但其无功功率输出能力受到视在容量、有功功率的限制，其无功调节范围和安装容量、有功输出功率三

基金项目：中国石化股份科研项目（323086）

者之间时刻满足以下关系

$$\begin{cases} Q_{\mathrm{PV},t}^{\max}=\sqrt{S_{\mathrm{PV}}^{2}-P_{\mathrm{PV},t}^{2}} \\ Q_{\mathrm{PV},t}^{\min}=-Q_{\mathrm{PV},t}^{\max} \end{cases} \tag{1}$$

式中，$Q_{\mathrm{PV},t}^{\max}$、$Q_{\mathrm{PV},t}^{\min}$为$t$时刻光伏逆变器能够输出的无功功率的上限和下限；$S_{\mathrm{PV}}$为光伏逆变器的视在容量；$P_{\mathrm{PV},t}$为$t$时刻光伏逆变器的有功输出功率。

光伏逆变器有功-无功容量调节曲线关系如图1所示。

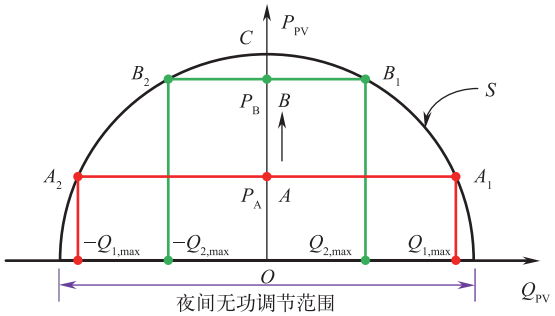


**图1　光伏有功-无功容量调节关系**

当分布式光伏只输出有功功率时，不向电网提供无功输出，工作点处于坐标轴$OC$段，此时分布式光伏将存在大量冗余容量闲置；当分布式光伏有功输出功率为$P_{\mathrm{A}}$时，其无功调节范围为$[-Q_{1,\max},Q_{1,\max}]$，光伏逆变器可根据需要发出无功工作在$AA_1$段或者吸收无功工作在$AA_2$段；当光照强度增加时，光伏逆变器有功功率增大，光伏有功输出上升为$P_{\mathrm{B}}$，无功调节范围为$[-Q_{2,\max},Q_{2,\max}]$，工作点可根据需要在$B_1B_2$段移动，无功调节范围变小；若此时无功需求较大，光伏逆变器亦可进行有功削减，使其有功工作点下移；当夜晚时，光伏逆变器工作在夜间SVG控制模式，有功输出能力为0，可以为电网提供大量无功支撑。

根据我国现行的“双碳”战略，应当尽量避免分布式光伏弃光现象的出现，不对有功功率进行削减，只调整无功功率。因此，在本文中仅考虑光伏逆变器工作在白天的最大功率点跟踪控制状态以及夜间SVG控制状态。

## 计及分布式光伏冗余容量的配电网无功优化模型

### 1. 目标函数

无功优化的目标函数有多种，有功损耗最小化是无功优化的常用目标，也是进行各种无功优化的基础。因此，有必要从降低网损率的角度建立无功优化模型。无功优化是根据具体的潮流断面情况，综合考虑多种等式、不等式约束，对无功补偿设备进行调控，建立以配电网网络损耗率最小的目标函数，公式为

$$\min f_1=f_{\mathrm{PLoss}}=\frac{\left(P_{\mathrm{G},t}+P_{\mathrm{PV},t}-P_{\mathrm{load},t}\right)}{P_{\mathrm{G},t}+P_{\mathrm{PV},t}}\times 100\% \tag{2}$$

式中，$f_{\mathrm{PLoss}}$为系统网络损耗率；$P_{\mathrm{G},t}$为$t$时刻的网测功率源输出功率；$P_{\mathrm{PV},t}$为$t$时刻的光伏输出功率；$P_{\mathrm{load},t}$为$t$时刻的负荷功率。

### 2. 约束条件

在计及分布式光伏冗余容量的无功优化时同样需要满足电网安全基本运行要求，此外还需满足分布式光伏的有功无功出力约束。

（1）功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G},i}+P_{\mathrm{PV},i}-P_{\mathrm{L},i}-U_i\sum\limits_{j=1}^{N_{\mathrm{node}}}U_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}\right)=0 \\ Q_{\mathrm{G},i}+Q_{\mathrm{PV},i}-Q_{\mathrm{L},i}-U_i\sum\limits_{j=1}^{N_{\mathrm{node}}}U_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij}\right)=0 \end{cases} \tag{3}$$

式中，$P_{\mathrm{G},i}$、$Q_{\mathrm{G},i}$、$P_{\mathrm{PV},i}$、$Q_{\mathrm{PV},i}$、$P_{\mathrm{L},i}$、$Q_{\mathrm{L},i}$分别为节点$i$的网测功率源有功与无功出力、分布式光伏有功与无功出力、有功负荷与无功负荷；$G_{ij}$、$\theta_{ij}$、$B_{ij}$为分别为节点$i$、$j$之间的电导、相角差和电纳。

（2）节点电压约束

$$U_{i,\min}\leqslant U_i\leqslant U_{i,\max} \tag{4}$$

式中，$U_{i,\min}$和$U_{i,\max}$分别表示节点$i$的电压下限值和上限值。

（3）线路电流约束

$$I_i<I_{i,\max} \tag{5}$$

式中，$I_{i\max}$为线路中允许的最大电流。

（4）光伏无功出力约束

当光伏逆变器工作在最大功率点跟踪控制状态时

$$\begin{cases} P_{\mathrm{PV}}=P_{\mathrm{PV,MPPT}} \\ -\sqrt{S_{\mathrm{PV}}^{2}-P_{\mathrm{PV}}^{2}}\leqslant Q_{\mathrm{PV}}\leqslant\sqrt{S_{\mathrm{PV}}^{2}-P_{\mathrm{PV}}^{2}} \end{cases} \tag{6}$$

当光伏工作在夜间SVG控制状态时

$$\begin{cases} P_{\mathrm{PV}}=0 \\ -S_{\mathrm{PV}}\leqslant Q_{\mathrm{PV}}\leqslant S_{\mathrm{PV}} \end{cases} \tag{7}$$

式中，$P_{\mathrm{PV}}$为光伏系统的有功出力；$P_{\mathrm{PV,MPPT}}$为光伏系统最大追踪点功率；$S_{\mathrm{PV}}$为光伏系统容量；$Q_{\mathrm{PV}}$为光伏无功出力。

3. 决策变量

在考虑分布式光伏冗余容量的配电网无功优化模型中，除节点电压、电流和功率外，光伏有功功率也为状态变量，需要进行控制优化的决策变量为分布式光伏在某一时刻下的无功功率，可表示为

$$X=[Q_{\mathrm{PV},t_1},\cdots,Q_{\mathrm{PV},t_m}] \tag{8}$$

式中，$Q_{\mathrm{PV},t_m}$为$t_m$时刻分布式光伏所对应的无功输出。

## 优化模型求解

1. 改进粒子群算法

（1）Levy飞行策略

随着决策变量维度的增加，分布式光伏选址定容模型在求解过程中陷入局部最优的可能性将会增大。为改善这一问题，提升算法的局部和全局搜索能力，避免粒子在搜索过程中收敛至局部最优解，本文将Levy飞行策略与粒子群算法结合。Levy飞行策略最早由法国科学家莱维在1937年提出，是一种随机游走模型，其特点是在游走过程中进行频繁小距离变化和偶尔长距离跳跃，从而更有效地探索未知大型搜索空间，避免陷入局部极值。在实际应用中常用mantegna方法生成服从levy分布随机步长，公式为

$$\begin{cases}\mathrm{Levy}(\beta)=\mu/|\nu|^{-\beta}\\ \mu=N(0,\sigma_\mu^2)\\ \nu=N(0,\sigma_\nu^2)\end{cases} \tag{9}$$

式中，$\mu$和$\nu$是Levy飞行策略中的两个服从正态分布的随机变量，$\beta$=1.5。标准差公式为

$$\begin{cases}\sigma_\mu=\left\{\dfrac{\Gamma(1+\beta)*\sin(\pi\beta/2)}{\beta\Gamma(1+\beta/2)*2^{(\beta-1)/2}}\right\}\\ \sigma_\nu=1\end{cases} \tag{10}$$

式中，$\Gamma$为gamma分布函数。

Levy飞行前100步二维平面飞行轨迹如图2所示，所涉及的步长为无量纲的单位步长。

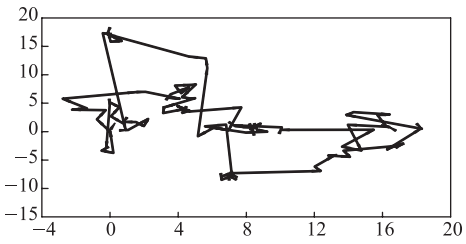


图2　Levy飞行轨迹

（2）非线性惯性权重递减策略

惯性权重$w$影响PSO算法的性能，代表着粒子之间的速度继承程度。其值较大时有利于全局搜索，其值较小时有利于精细寻找局部最优值，在标准PSO算法中其值为常数（取0.6），算法收敛速度整体趋于一致，导致全局搜索能力差且易于陷入局部最优。针对惯性权重的改进常以线性递减变化方法对其进行动态调整，以提升算法在前期和后期的搜索效率，但实际的寻优搜索过程往往是非线性的，并且随着搜索范围和决策变量维度的增加，该方法往往导致粒子更新能力不够而陷入局部最优。故本文提出一种非线性惯性权重递减策略对线性因子进行改进，公式为

$$w(t)=\frac{w_{\max}-w_{\min}}{2}\cos\left(\frac{\pi}{T_{\max}}t\right)+\frac{w_{\max}+w_{\min}}{2} \tag{11}$$

式中，$T_{\max}$为最大迭代次数；$t$为当前寻优过程中的迭代次数；$w_{\max}$、$w_{\min}$分别为惯性权重的最大值与最小值。

2. 模型求解流程

采用上述所提的基于Levy飞行和非线性惯性权重递减策略的改进粒子群算法（LNLPSO）对模型进行求解，其优化求解流程如图3所示。

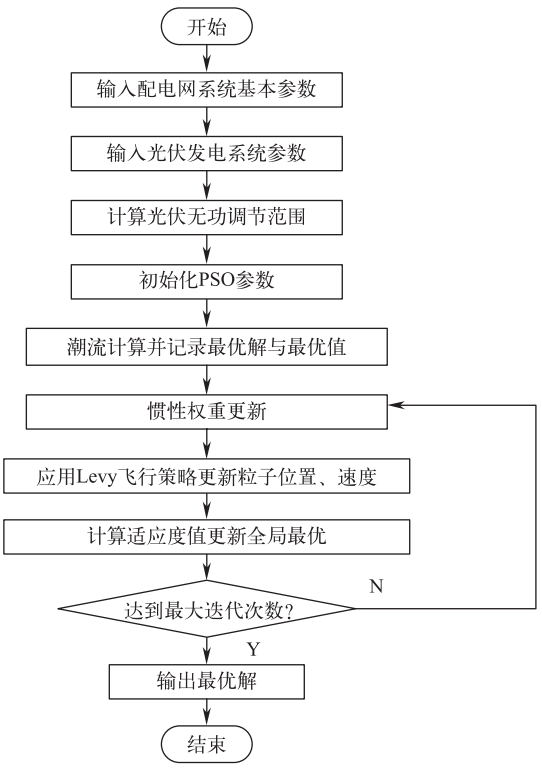


图3　模型求解流程

## 算例仿真分析

### 1. 算例介绍

本节以图4所示的胜利油田分公司孤东采油厂配电线路作为算例，采用改进粒子群算法对该配电线路拓扑结构的无功优化模型进行仿真分析。该配电网有83个节点，82条支路，网络首端节点电压为6.3 kV，系统标准有功负荷为878.6 kW，无功负荷为1 171.47 kvar，三相功率基准取值1 MV·A，17号杆65节点处的光伏电站容量为0.4 MW，19号杆67节点处的光伏电站容量为0.56 MW，24号杆79节点处的光伏电站容量为0.6 MW。

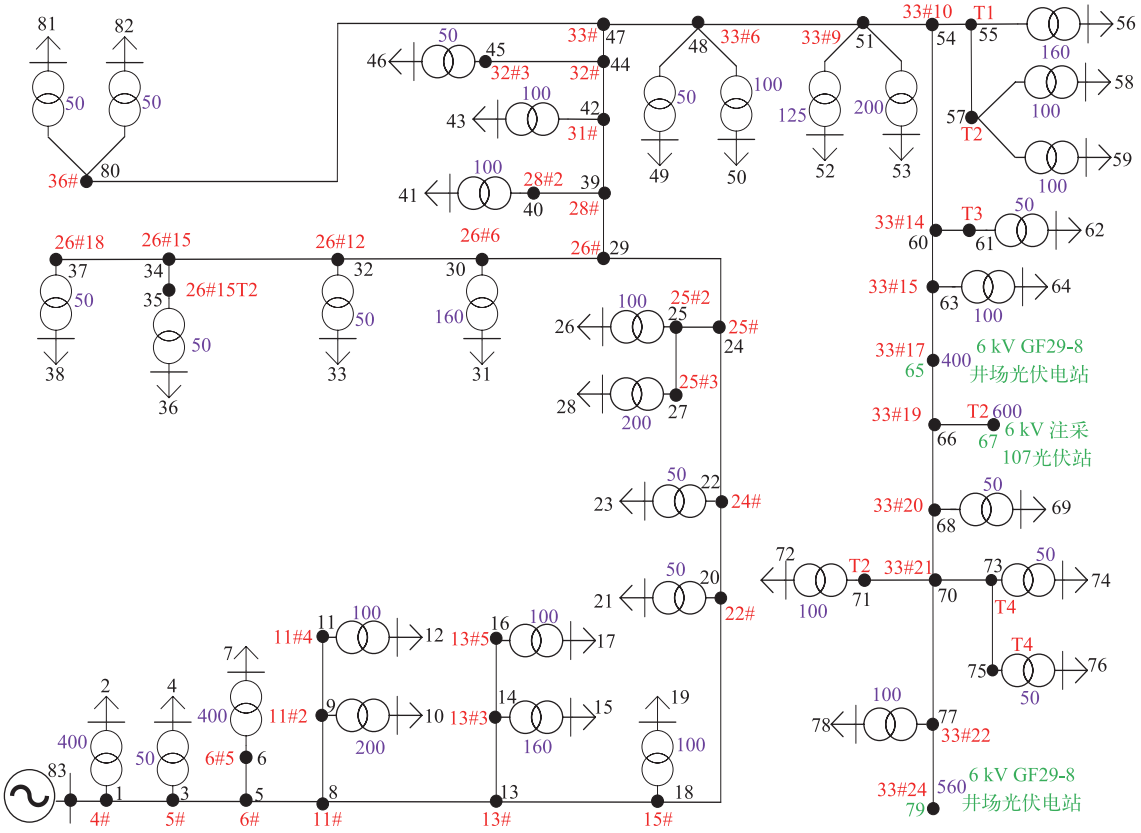


图4　孤东采油厂配电网拓扑结构

典型日全天24 h三座光伏电站的光伏出力变化曲线如图5所示，光伏出力数据为孤东采油厂配电网2024年5月7日作为晴朗典型日的光照数据。

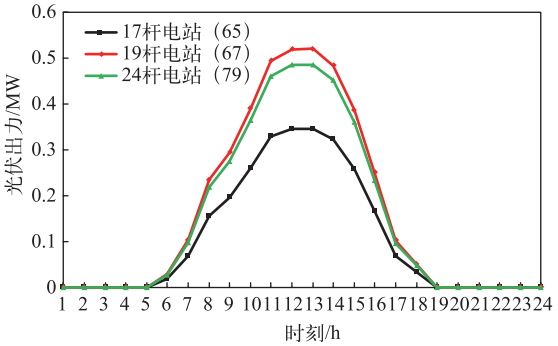


图5　全天24 h光伏出力变化

由图5可以看出三座光伏电站在13时光伏有功输出最大，在夜间有功输出为0。其余时间随太阳高度角的增大和减小，光伏有功输出相应变化。

### 2. 优化结果分析

为了验证本文所提的光伏逆变器冗余容量无功优化模型的适用性和优越性，根据现场实际要求，设置三组方案，分别为：方案一，三座光伏电站仅发出有功，均未进行无功优化；方案二，三座光伏电站正常发出有功，仅65节点和79节点两座光伏电站进行无功优化；方案三，三座光伏电站正常发出有功，同时全部进行无功优化。

方案二65节点和79节点各时刻无功优化结果如图6所示。

方案三65节点、67节点和79节点参与无功优化结果如图7所示。

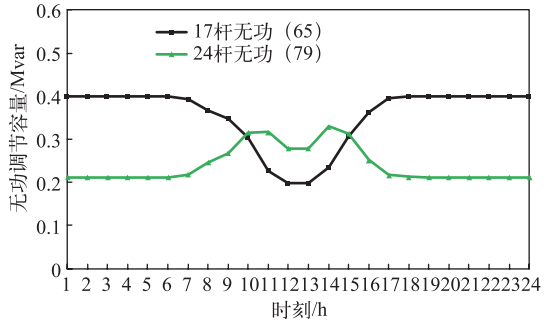


图6　方案二无功优化结果

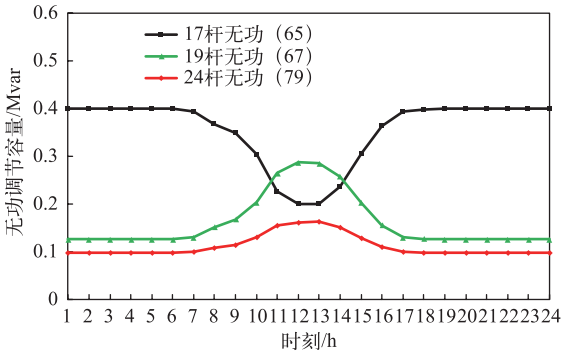


图7　方案三无功优化结果

根据图6、图7可以看出，当采用光伏逆变器冗余容量进行无功优化时，在夜晚有功输出为0，此时光伏存在大量的冗余容量，方案二中65节点光伏冗余容量全部参与无功调节，无功出力为0.4 Mvar，79节点光伏无功出力为0.21 Mvar，部分参与无功调节；光伏有功出力较小时（6:00—11:00、14:00—19:00），随着有功出力的增加光伏冗余容量变小，65节点光伏冗余容量全部参与无功调节，无功出力逐渐变小，然而79节点光伏冗余容量充足，无功出力将会变大；光伏出力较大时（11:00—14:00），光伏冗余容量均不足，无功出力同时变小。方案三中，65节点光伏冗余容量全部参与无功调节，白天随着光伏有功出力的增加逐渐变小。67节点和79节点冗余容量充足，并未达到上限，无功出力逐渐变大。利用光伏冗余容量进行无功优化能够使这部分闲置能量得到充分利用，提高能源的利用率。

不同优化方案对应的各时刻网络损耗率变化如图8所示。

根据图8可以看出，当方案一不采用无功优化时，分布式光伏仅输出有功功率，在夜晚光伏有功输出为0，系统网络损耗率不变；白天，在6:00—10:00及15:00—19:00，分布式光伏出力就近满足负荷需求，减少了支路上功率流动带来的损耗，网络损耗率降低；在10:00—15:00，光伏出力较大，潮流反向，网损率升高。当采用无功优化后，方案二和方案三的系统网络损耗率在全天各个时刻均有了明显的降低。

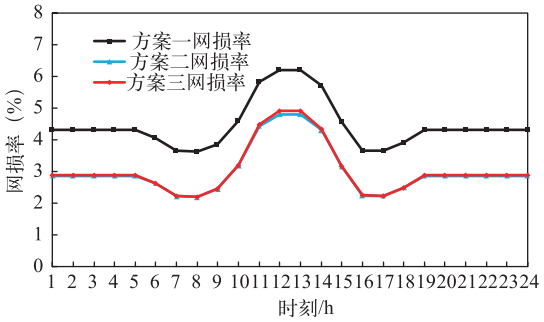


图8　不同方案下对应的24小时网损率优化结果

不同方案下配电网全天平均网损率指标见表1。

表1　不同方案配电网全天平均无功优化结果

| 方案 | 平均网损率（%） | 环比降低（%） |
|---|---|---|
| 1. 光伏仅发出有功 | 4.456 2 | / |
| 2. 65、79节点光伏无功优化 | 3.048 2 | 31.597 4 |
| 3. 65、67、79节点光伏无功优化 | 3.028 0 | 32.050 5 |

根据表1各方案的优化结果可以看出，孤东采油厂配电网的初始平均网络损耗率为4.456 2%。在此基础上进行两种方案的无功优化，系统平均网络率损耗进一步降低至3.048 2%、3.028 0%，分别环比下降31.597 4%、32.050 5%。综上所述，本文所提的无功优化模型进行优化配置后，配电网网络损耗率大幅度减少，有效地支持了配电网络的能效提升。

为验证本文所提算法的优越性，对标准粒子群算法、惯性权重递减策略和本文所提的LNLPSO改进算法进行比较，如图9所示。

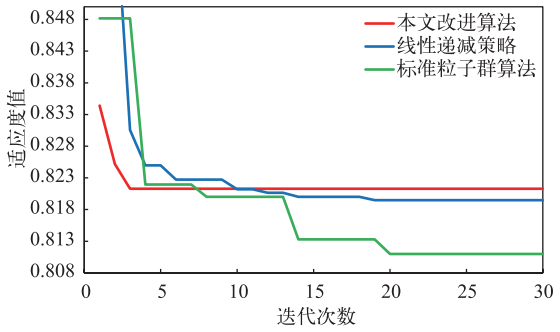


图9　算法性能对比

（下转第85页）

的安全稳定，提高电网的韧性。

## 结束语

接入新能源不仅会增加节点电压，导致节点电压波动等电能质量问题，还会导致继电保护问题和热稳定性问题，如线路短路电流上升等。本文建立配电网新能源承载能力的计算模型，并利用粒子群优化算法对配电网新能源承载能力进行计算和分析。研究发现，越靠近线路末端的节点越容易违反系统安全性和稳定性限制。配电网接入储能后，系统的可调容量增大。接入配电网的储能，可以有效提高配电网的托管能力。**EA**

（收稿日期：2025-05-23）

### 参考文献

[1] 杨旭英，段建东，杨文宇，等．含分布式发电的配电网潮流计算[J]．电网技术，2009，33(18)：139-143．

[2] 胡海兵，吴思，夏翔，等．计及电压调整约束的多分布式电源接入配电网最大穿透功率计算[J]．中国电机工程学报，2006，26(19)：13-17．

[3] 雷娟，黄伟，夏翔，等．计及相间短路故障的分布式电源穿透功率极限计算[J]．电力系统自动化，2008．

[4] 钟清，高翔，于娜，等．主动配电网谐波约束下分布式电源接纳能力及方式[J]．电力系统自动化，2014(24)：108-113．

[5] 高孟友．智能配电网分布式馈线自动化技术[D]．济南：山东大学，2016．

（上接第69页）

## 结束语

本文针对利用分布式光伏逆变器冗余容量进行无功优化问题展开研究，建立以系统网络损耗率最小为优化目标的无功优化模型，结合Levy飞行、非线性惯性权重更新提出一种改进粒子群算法对优化模型进行求解，并通过现实中的孤东采油厂油田线路进行仿真验证。结果表明，改进的粒子群算法拥有更快的全局寻优能力和更高效搜索效率；考虑光伏无功输出能力进行线路优化，能够在光伏有功出力的基础上进一步降低系统网损率，提高能源的利用率。**EA**

（收稿日期：2025-04-10）

### 参考文献

[1] 李安乐，田晶京，赵峰，等．含光伏电源的配电网潮流计算[J]．电测与仪表，2020，57(10)：58-63．

[2] 喻恒凝，黄力，张思东，等．分布式光伏和电动汽车接入对配电网网损和电压偏移影响的分析研究[J]．智慧电力，2020，48(1)：28-34．

[3] 庄园，王磊．分布式电源在配电网络中优化选址与定容的研究[J]．电力系统保护与控制，2012，40(20)：73-78．

[4] 徐渊．改进粒子群算法在含分布式电源配电网优化重构中的应用[J]．电测与仪表，2021，58(3)：98-104．

[5] 章力，高元海，熊宁，等．考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]．电力系统自动化，2014，38(17)：43-48．

[6] 刘梦，杨作梁．考虑网架结构和分布式电源的主动配电系统双层规划[J]．电测与仪表，2018，55(14)：46-50，81．