

# 考虑源-储特性的分布式电源并网阶段 优化与评估方法

张永会<sup>1</sup>, 张亚谱<sup>2</sup>, 潘 超<sup>2</sup>, 鹿 丽<sup>2</sup>, 罗远翔<sup>2</sup>, 鲍 峰<sup>1</sup>

(1. 松花江水力发电有限公司吉林白山发电厂, 吉林 132012;

2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 132012)

**摘 要:** 风光发电的随机性和波动性增大了分布式电源协调供电的难度。针对该问题引入储能电池平抑风光波动, 采用阶段式优化与评估方法对含风电、光伏等分布式电源的配电网配置进行研究。第1阶段考虑负荷有功网损灵敏度的影响, 确定风光电源的接入位置和容量; 第2阶段首先以网损最小为目标确定储能电池的安装位置, 然后综合考虑投资成本、电压稳定及弃风弃光率建立多目标函数, 采用模拟退火-粒子群混合算法优化储能容量; 第3阶段考虑风光出力的不确定性, 采用概率潮流对储能平抑前后的电压和网损进行评估。最后, 结合东北地区某实际配电系统进行仿真分析, 验证该文方法的正确性和有效性。

**关键词:** 分布式电源; 优化算法; 选址; 概率潮流; 风光储

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

## 0 引 言

含风光新能源的分布式电源(DG)是智能电网的重要组成部分, DG对配电网的影响与其安装位置和容量密切相关<sup>[1-2]</sup>。合理配置DG能有效降低网络损耗, 提高电压水平, 保证电能质量<sup>[3-5]</sup>。由于风电、光伏等新能源出力具有间歇性和不稳定性等特点, 从而提高了区域电网调度的难度<sup>[6-8]</sup>。因此, 如何合理配置DG以及提高风光消纳能力已成为专家学者关注的热点问题之一。

国内外专家学者在合理配置DG方面开展了大量研究。文献[9]提出一种分布式电源集群规划方法, 并建立分布式光伏与储能双层协调选址定容规划模型。文献[10]提出一种计及电压稳定性评估的配电网DG选址定容决策方法, 并采用多目标决策方法对DG接入配电网的位置和容量进行决策。文献[11]针对新能源并网的电压越限问题, 以总成本最小为目标规划储能电池的接入, 但未考虑新能源发电的不确定性。文献[12]考虑环境成本建立微网DG选址定容规划模型, 并采用随机潮流计算系统损耗。文献[13]提出一种改进多目

标微分进化算法求解DG选址定容模型, 通过对最优解集进行排序, 得到最终决策方案。上述研究由于缺乏对储能的应用和新能源发电不确定性的分析, 导致在解决实际问题时存在一定局限性。

本文采用阶段式优化方法对含风光储的配电网进行DG选址定容。首先以网损灵敏度确定风光电源接入位置和容量; 然后以网损为目标初步优选储能电池的安裝位置, 并结合运行效益、系统稳定及风光消纳等方面建立多指标模型, 采用模拟退火-粒子群混合算法(SA-PSO)求解得到储能容量的优化方案; 在此基础上采用概率潮流评价所选的优化方案, 考虑风光出力的不确定性, 对储能平抑前后的电压和网损进行评估, 并通过实际算例对本文所采用的优化方法进行验证。

## 1 风光电源选址定容

DG未并网时, 通过节点 $i$ 的负荷有功网损灵敏度 $F_i$ 来判断DG安装位置, 负荷节点的有功网损灵敏度表示该节点引起有功损耗的大小<sup>[14-15]</sup>, 若该节点接有负荷, 则该节点对网络损耗影响较大; 反之, 若该节点属于

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB0900100); 常规水电站结合抽蓄、光伏、风电、电化学储能联合开发研究(525687200009)

通信作者: 张亚谱(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网优化方面的研究。449791498@qq.com

联络节点,无负荷功率流出,则该节点有功网损灵敏度为零。通过对各节点有功网损灵敏度的计算,可以有效

反映出节点功率波动时对整个网络潮流及损耗的影响情况。有功网损灵敏度  $F_i$  计算式为:

$$F_i = \sqrt{\left( (P_i^2 + Q_i^2) \cdot \sum R_{si}^2 + 2P_i \cdot \sum R_{si} \cdot \left( P_i \sum R_{si} + Q_i \sum X_{si} \right) - \left( P_i \sum R_{si} + Q_i \sum X_{si} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

式中,  $P_i$ 、 $Q_i$  ——  $i$  节点的负荷有功、无功功率;  $\sum R_{si}$ 、 $\sum X_{si}$  —— 根节点  $s$  至节点  $i$  的等值电阻和电抗。可由  $F_i$  的大小确定 DG 的安装位置,  $F_i$  的值越大,表明该节点引起的有功损耗越大,应在该节点优先安装 DG 来调整等效负荷,从而降低网损。

风光电源优化选址目标函数为:

$$\begin{cases} \max f = F_i(x) \\ \text{s.t. } U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x$  —— 风光电源安装位置变量;  $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$  —— 节点  $i$  允许的电压限值。

待选节点  $i$  所安装 DG 的有功功率  $P_{Gi}$  为:

$$P_{Gi} = \mu \cdot P_{T\max} \cdot \frac{F_i}{\sum_{i \in f} F_i} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  —— DG 总接入容量占  $P_{T\max}$  的比;  $P_{T\max}$  —— 上一级主变最大容量, MW;  $N_{DG}$  —— DG 的安装数量;  $f$  —— 安装位置集合。

## 2 储能电池选址定容

储能电池的优化首先以网损为目标确定储能电池的安裝位置,然后以投资运行成本、电压偏移和弃风弃光率最优为目标函数,采用模拟退火-粒子群混合算法优化储能容量,并设置权重因子,根据决策者的侧重方向选择最优方案。

### 2.1 储能电池优化选址

蓄电池储能系统能够动态吸收能量并适时释放,平抑风光出力的波动性,提高风电的消纳能力<sup>[16]</sup>。本文储能选址考虑储能在接入不同位置时引起的系统网损不同,以有功损耗最小为目标函数,采用粒子群优化算法优化储能安装位置。目标函数为:

$$f_{\text{ESS}} = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [U_i^2 Y_{ij} \cos \theta_{ij} - U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_{ij} + \theta_{ij})] \quad (4)$$

式中,  $N$  —— 系统节点数;  $M$  —— 负荷节点数;  $U_i$ 、 $U_j$  —— 节点电压;  $Y_{ij}$  —— 线路导纳;  $\delta_{ij}$  —— 节点电压相角差;  $\theta_{ij}$  —— 线路  $i-j$  的阻抗角。

### 2.2 多目标优化确定储能容量

#### 2.2.1 优化目标函数

##### 1) 投资成本比

以折算到每年的投资成本与年售电收益的比值作

为经济性指标,目标函数为:

$$f_1 = \frac{C_{\text{IN}} + C_E + C_{\text{AW}}}{B_{\text{PRO}} + B_{\text{SUB}}} \quad (5)$$

式中,  $C_{\text{IN}}$  —— 折算到每年的 DG 安装成本, 万元;  $C_E$  —— 储能电池投资成本, 万元;  $C_{\text{AW}}$  —— 年风电弃风成本, 万元;  $B_{\text{PRO}}$  —— 年售电利润, 万元;  $B_{\text{SUB}}$  —— 新能源政府补贴, 万元。

##### 2) 节点电压偏移

以每个节点的平均电压偏移作为电压稳定性的优化指标,目标函数为:

$$f_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{U_i - U_{iN}}{U_{iN}} \right| \quad (6)$$

式中,  $U_{iN}$  —— 节点  $i$  额定电压。

##### 3) 弃风弃光率

以所选时段内弃风弃光量与风光总出力的比值作为风光消纳指标,目标函数为:

$$f_3 = \frac{\sum_{t=1}^T [P_{\text{aw}}(t) + P_{\text{apv}}(t)]}{\sum_{t=1}^T [P_w(t) + P_{\text{pv}}(t)]} \quad (7)$$

式中,  $P_{\text{aw}}$ 、 $P_{\text{apv}}$  —— 弃风、弃光量;  $T$  —— 总时段数;  $P_w$ 、 $P_{\text{pv}}$  —— 风、光出力。

##### 4) 多目标优化配置模型

文中综合考虑最小综合投资成本比、最小平均电压偏移和最小弃风弃光率建立多目标优化模型优化储能容量。对多目标函数采用加权的形式得到总的适应度函数为:

$$\begin{cases} F = \omega_1 \cdot \frac{f_1}{f_{1\max}} + \omega_2 \cdot \frac{f_2}{f_{2\max}} + \omega_3 \cdot \frac{f_3}{f_{3\max}} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  —— 各目标函数权重;  $f_{1\max}$ 、 $f_{2\max}$ 、 $f_{3\max}$  —— 用作归一化处理的各目标函数最大值。

#### 2.2.2 约束条件

##### 1) 功率平衡约束

$$P_s = \sum_{i=1}^N P_{Li} + P_{\text{LOSS}} - \sum_{d=1}^{N_{\text{DG}}} P_d \quad (9)$$

式中,  $P_s$  —— 电网注入功率;  $P_{Li}$  ——  $i$  节点负荷注入功率;  $P_{\text{LOSS}}$  —— 电网损耗;  $P_d$  —— 第  $d$  类 DG 发出的功率。

## 2) 储能系统充放电功率约束和荷电状态约束

$$\begin{cases} P_{\text{chamin}} \leq P_{\text{cha}} \leq P_{\text{chamax}} \\ P_{\text{dismin}} \leq P_{\text{dis}} \leq P_{\text{dismax}} \\ SOC_{\text{min}} \leq SOC \leq SOC_{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{cha}}$ 、 $P_{\text{dis}}$ ——储能系统充、放电功率;  $P_{\text{chamin}}$ 、 $P_{\text{chamax}}$ ——储能电池充电功率限值;  $P_{\text{dismin}}$ 、 $P_{\text{dismax}}$ ——储能电池放电功率限值;  $SOC$ ——储能系统的荷电状态;  $SOC_{\text{min}}$ 、 $SOC_{\text{max}}$ ——储能荷电状态限值。

### 2.2.3 多目标模拟退火-粒子群混合算法

模拟退火算法(simulated annealing, SA)在搜索时有概率突跳的能力<sup>[17]</sup>,在标准粒子群算法<sup>[18]</sup>(particle swarm optimization, PSO)中引入模拟退火的思想,能有效避免在搜索过程中陷入局部最优。本文采用多目标 SA-PSO 混合算法优化 DG 功率。

改进的算法应用 Metropolis 准则,粒子在温度  $t_s$  时由当前状态  $p$  产生新状态  $q$ , 2 种状态的能量值分别为  $E_p$  和  $E_q$ , 若  $E_p > E_q$ , 则必定接受新状态  $q$  为当前状态; 否则以一定的概率  $e$  来接受新状态  $q$ 。

$$e = \exp\left(\frac{E_p - E_q}{k_b t_s}\right) \quad (11)$$

式中,  $k_b$ ——玻尔兹曼常数。

SA-PSO 混合算法计算流程如图 1 所示。混合算法的粒子群进化后在接受当前最优解的同时还会存在一定的概率接受较差的解,保持了粒子的多样性,使其能

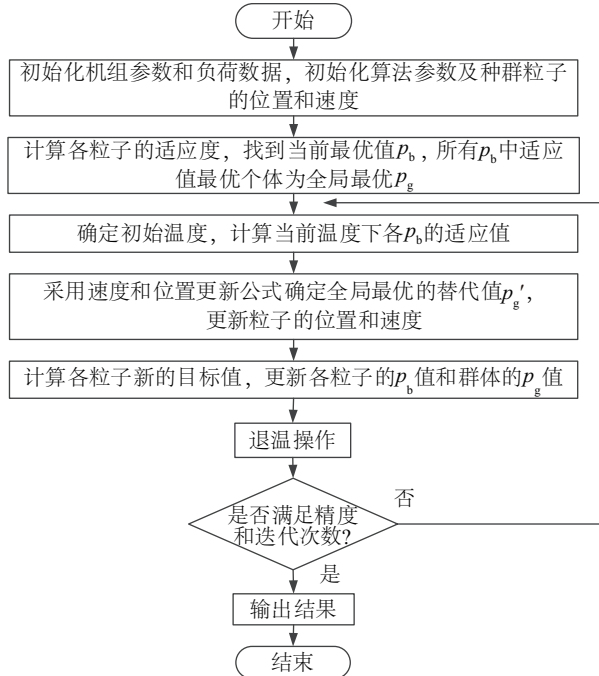


图1 SA-PSO算法流程

Fig. 1 Simulated annealing-particle swarm algorithm flow

够跳出局部最优。该算法能自适应调整退火温度,随着温度下降,粒子逐渐形成低能量的基态,收敛于全局最优解。

## 3 基于概率潮流的优化方案评价

考虑风光出力的不确定性,采用概率潮流对系统优化配置方案进行评估。

### 3.1 阶段式优化流程

本文采用的阶段式优化方法具体流程见图 2。



图2 阶段式优化流程

Fig. 2 Staged optimization process

### 3.2 离散型随机变量

假设将  $R$  个风光出力单元作为  $R$  个离散型随机变量  $X_r (r=1, 2, \dots, R)$  接入系统<sup>[19]</sup>, 其向量形式为:

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_r, \dots, X_R] \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{X}$ —— $R$  个风光单元的随机出力组成的向量;  $X_r$ ——第  $r$  个单元的输出功率。

离散型风光出力随机变量  $X_r$  的概率分布可表示为:

$$p_{hr} = P_r(X_r = x_{hr}), \quad h_r = 1, 2, \dots, H_r \quad (13)$$

式中,  $H_r$ ——第  $r$  个风光单元的工作状态的数量;  $x_{hr}$ —— $X_r$  工作于第  $h$  个状态时的输出功率。因此离散

向量  $X$  的离散点数量为:

$$H_z = \prod_{r=1}^R H_r \tag{14}$$

### 3.3 多次确定性潮流计算

多次确定性潮流计算的次数为  $H_z$ , 第  $k$  次计算的输入向量可表示为:

$$I_k = [P_L, X]_N \tag{15}$$

式中,  $P_L$  ——等效负荷离散型变量;  $N$  ——系统节点数量, 也是  $I_k$  的维度。

将输入变量代入潮流方程, 得到电压向量  $B_k$  和支路潮流向量  $C_k$ 。得到向量  $B_k$  和  $C_k$  的概率值与  $I_k$  对应, 据此对系统进行电压和网损概率评估。

## 4 算例分析

以东北地区某实际 82 节点配电系统为例, 总负荷为 71175 kW+j44128 kvar, 系统接线如图 3 所示。35 kV 主变  $P_{Tmax} = 140$  MW, DG 容量占比  $\mu = 25\%$ , 系统接入 20 MW 风电 (10 MW×2) 和 16 MW 光伏电源 (8 MW×2)。

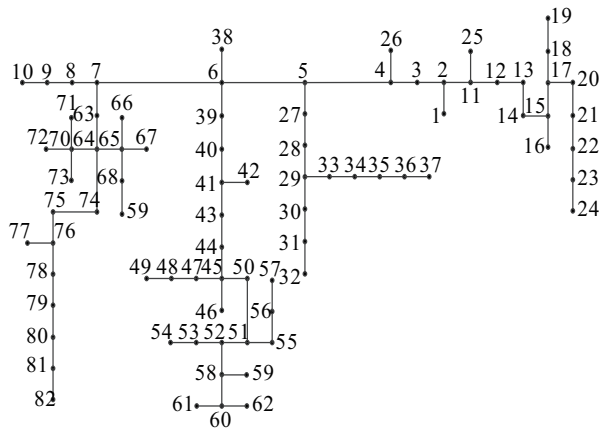


图3 82节点实际系统接线图  
Fig. 3 82-bus actual system wiring diagram

第 1 阶段考虑源-荷特性计算各节点网损灵敏度  $F_i$  确定 DG 并网初始安装位置, 如图 4。根据图 4 可知, 节点 22、35、62、77 在接入 DG 时网损波动影响较小, 从而确定风光发电单元的安装位置。结合有功网损、负荷节点输送功率及容量占比确定 DG 的装机容量见表 1。

第 2 阶段首先以网损最小为目标优化储能电池的 安装位置, 优化结果如图 5 所示。结果表明, 储能电池接入 5 节点时系统损耗最少为 4619 kW。

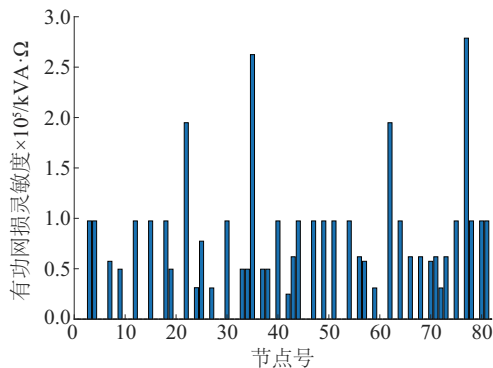


图4 各节点网损灵敏度  
Fig. 4 Network loss sensitivity of each bus

表1 DG安装容量和类型  
Table 1 DG installation capacity and type

DG 安装位置	$F_i \times 10^5 / \text{kVA} \cdot \Omega$	DG 计算输送功率/kW	DG 实际安装容量/kW	DG 安装类型
22 节点	1.9488	7326.9	8000	光伏
35 节点	2.6242	9866.3	10000	风电
62 节点	1.9486	7326.1	8000	光伏
77 节点	2.7876	10480.7	10000	风电

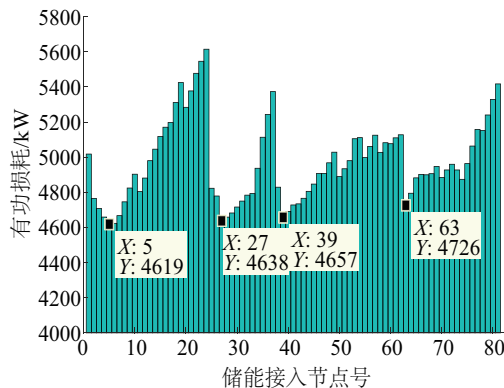


图5 储能不同接入位置时的支路损耗  
Fig. 5 Power loss when energy storage battery is connected to different locations

综合考虑经济和技术指标优化储能电池的容量。风光机组出力如图 6 和图 7 所示, 选取一周采样时段数为  $T$  (间隔×天数)=84 个。

考虑综合投资效益、电压稳定和弃风弃光率, 采用 SA-PSO 算法对储能安装容量进行优化。算法中初始种群大小为 50, 最大迭代次数为 150, 学习因子  $c_1 = c_2 = 1.593$ , 退火常数为 0.5。综合考虑 3 种优化指标, 得到优化结果 Pareto 分布如图 8 所示。



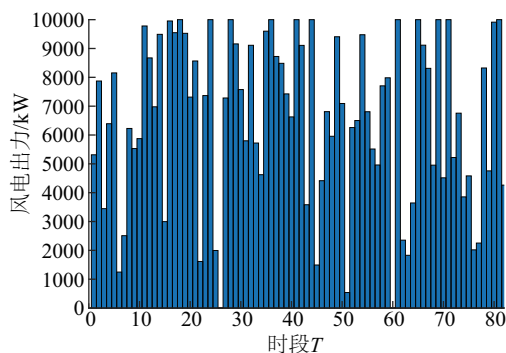


图6 风电出力时序图

Fig. 6 Wind power output timing diagram

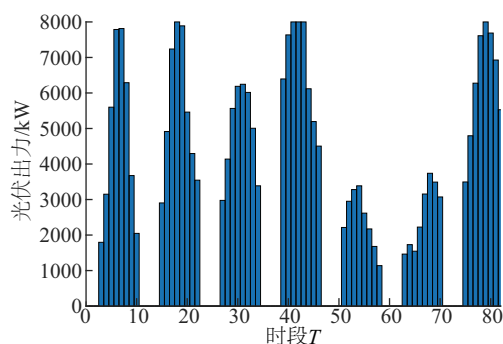


图7 光伏出力时序图

Fig. 7 Photovoltaic output timing diagram

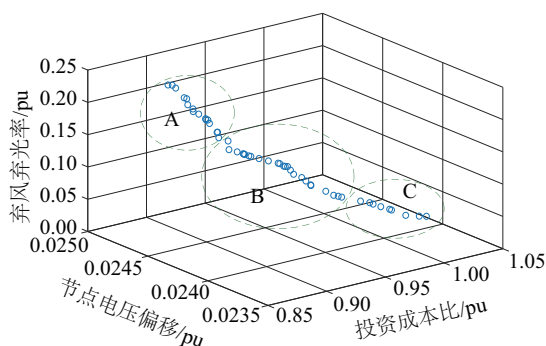


图8 多目标优化Pareto解集

Fig. 8 Multi-objective optimization Pareto solution set

图8中 Pareto 解集包含3个可行域:区域A的解集表现为弃风弃光率较高,平均节点偏移较大,但投资成本较小;区域C解集则表现为投资成本较大,但弃风弃光率和电压偏移均较小;区域B分的解集表示优化目标结果介于左右部分之间。根据不同的意愿,可考虑不同的侧重方向选择最优解。

结合运行效益、系统稳定及风光消纳的不同侧重方向,多组优化结果的典型方案如表2所示,加粗一行的方案6不同于前面几个方案的简要分析,表示本文在第3阶段概率评估时采用的一个最优方案。

由表2可知,在系统未接入储能时,投资成本最小,但系统电压稳定性较差,弃风弃光现象最严重,弃风弃光率达到约21.36%。均衡考虑经济性、电压稳定和风光消纳时,投资成本比提高了21.12%,但弃风弃光现象得到较大改善,弃风弃光率为4.99%;侧重于考虑经济性时,储能安装容量最少为24.8 MW,此时投资最少,但风光消纳能力不是最强;侧重考虑风光消纳时,储能安装容量最大为39.4 MW,弃风弃光率为3.58%,但投资较大。各典型方案中电压偏移范围较小,均满足电压稳定性;但在投资成本比和弃风弃光率方面存在较大差异,两者亦存在一定联系,风光消纳率越低,新能源渗透率越低,运行效益越差,反之,提高风光消纳能力能够提高运行效益。故方案6重点考虑稳定性和新能源消纳能力,储能最优安装容量为38.5 MW。

以方案6为例,风光-储能协调出力过程如图9所示。由图9可知,在储能电量充足时,风光总出力达到22 MW,新能源得到较好的消纳。经过储能的平抑作用,风光出力的随机波动性得到较大改善,从而降低了对系统的影响。

引用文献[17]的SA方法和文献[18]的PSO方法对算例进行仿真和对比,不同算法的优化效果对比如图10所示。

表2 不同权重下的多目标优化结果

Table 2 Multi-objective optimization results under different weights

方案	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	投资成本比	电压偏移率/%	弃风弃光率/%	总适应度	储能容量/MW
1	未接入储能			0.8264	2.6856	21.3578	—	0
2	1/3	1/3	1/3	1.0009	2.4763	4.9935	0.8205	36.6
3	0.6	0.2	0.2	0.9886	2.4738	5.3942	0.7281	34.8
4	0.2	0.6	0.2	0.9974	2.4521	5.0736	0.6672	35.4
5	0.2	0.2	0.6	1.0199	2.4697	3.5782	0.6980	39.4
6	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.9979</b>	<b>2.4632</b>	<b>4.6548</b>	<b>0.8376</b>	<b>38.5</b>

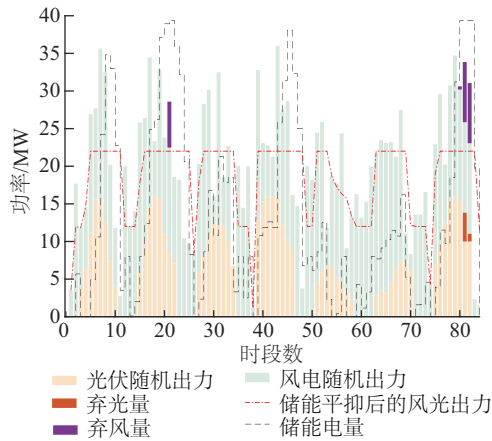


图9 方案6风光储协调出力过程

Fig. 9 Coordinated output process of wind power, photovoltaic and energy storage in option 6

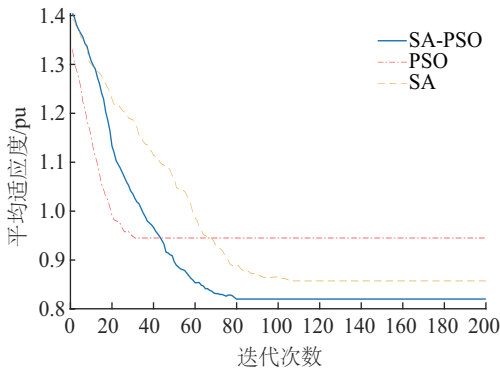


图10 不同算法优化效果对比

Fig. 10 Optimization effects of different algorithms

表3 不同算法时间对比

Table 3 Comparison of computing time of different algorithms

配置算法	SA-PSO	PSO	SA
所用时间/s	1057.84	1043.46	2462.13

注: \*微机型号配置: Intel® Core™ i7 CPU 975 @3.33GHz 3.33GHz。

由图10和表3可知,3种算法在寻优过程开始时,搜索能力相近,但随着迭代次数增加,呈现出不同结果。标准PSO寻优速度较快,但易陷入局部最优,从而收敛精度变差,所得方案并非最优;SA寻优能力较强,但寻优速度较慢,计算时间较长;本文所采用的SA-PSO算法在标准PSO中引入模拟退火的思想,在寻优过程中有一定概率跳出既定搜索范围,避免在搜索过程中陷入局部最优,从而在保证计算效率的同时又具有较强的寻优能力。

第3阶段以概率的方式评估储能加入系统后的对电压稳定性和网损的影响。计算风光出力离散型变量,风光出力概率密度曲线如图10。不难看出,加入储能

后风光出力的概率分布更为集中,说明储能的平抑作用使风光出力的随机性减小,波动性降低。

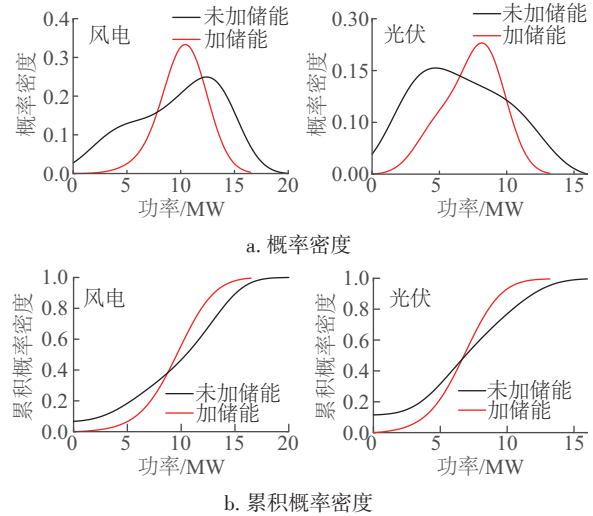


图11 风光出力概率密度曲线

Fig. 11 Wind power and photovoltaic output probability density

经过概率潮流计算得到电压和网损评价指标,其概率密度曲线如图12所示。图12中,未加储能的电压偏移方差为1.03,波动性较大;相比之下,在加入储能后的电压偏移方差为0.29,减小了71.9%,电压稳定性显著提高;未加储能时的系统损耗方差为29.19,加入储能后的损耗方差为14.77,减小了49.41%,系统网损得到明显降低。结果表明,按照该方案进行DG优化配置,能够有效改善系统的电压稳定和运行损耗。

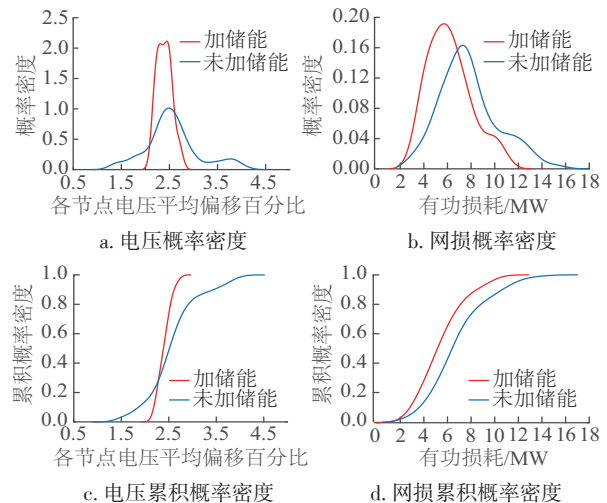


图12 电压与网损概率潮流响应

Fig. 12 Voltage and network loss probability tidal response

## 5 结论

本文采用阶段式优化方法对分布式电源并网进行

优化与评估,得出以下结论:

1)本文提出优化算法具有较强的全局搜索能力,可避免陷入局部寻优,从而能够在可行域内提供合理的多样性优化方案。算例仿真验证了所提方法的有效性和可行性。

2)风光储协调发电优化方案能够解决风光接入配网的时序消纳问题,通过风光电源与储能的合理配置能有效提高电压稳定水平并减少电网损耗,同时经过储能平抑后的风光出力更有利于电力调度。

### [参考文献]

- [1] 吴鸣,宋振浩,吕振宇,等.计及综合效益的虚拟同步化微电网二次调频策略[J].中国电机工程学报,2020,40(3):743-754.  
WU M, SONG Z H, LTU Z Y, et al. Secondary frequency regulation strategy of virtual synchronous microgrid considering comprehensive benefits [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 743-754.
- [2] 颜湘武,徐韵.考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化[J].电工技术学报,2019,34(20):4358-4372.  
YAN X W, XU Y. Multi-temporal-scale reactive power optimization of distribution networks considering dynamic network reconfiguration with multiple heterogeneous renewable distributed power sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4358-4372.
- [3] BUGAEVA T, Khabarov A, Novikova O, et al. Development and testing of the genetic algorithm to select a scenario of distributed generation power supply system [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2019, 497 (1) : <https://doi.org/10.1088/1757-899X/497/1/012056>.
- [4] 张宇精,乔颖,鲁宗相,等.含高比例分布式电源接入的低感知度配电网电压控制方法[J].电网技术,2019,43(5):1528-1535.  
ZHANG Y J, QIAO Y, LU Z X, et al. Voltage control method of low-perception distribution network with high proportion of distributed power access [J]. Power system technology, 2019, 43(5): 1528-1535.
- [5] WU W, GUO N, DENG Z M, et al. Analysis of influence of distributed power supply on distribution network voltage considering permeability [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2019, 227(3) : <https://doi.org/10.1088/1755-1315/227/3/032039>.
- [6] ZENG M, CHEN W C, LIU Y X, et al. The research on the optimization of natural gas distributed power supply and pipeline based on the stochastic expectation model [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2018, 452 (3) : <https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/3/032037>.
- [7] 朱永胜,乔百豪,瞿博阳,等.含风电及电动汽车的多目标电力系统调度[J].太阳能学报,2019,40(6):1722-1730.  
ZHU Y S, QIAO B H, QU B Y, et al. Multi-objective power system dispatching including wind power and electric vehicles [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(6): 1722-1730.
- [8] 盛万兴,吴鸣,季宇,等.分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2175-2186,1.  
SHENG W X, WU M, JI Y, et al. Key technologies and engineering practice of grid-connected consumption of distributed renewable energy power generation clusters [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186, 1.
- [9] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201,2.  
DING M, FANG H, BI R, et al. Clustered partition-based distributed photovoltaic and energy storage site capacity planning for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201, 2.
- [10] 孙顺祥,李晓明,刘振盛,等.计及电压稳定性评估的配电网DG选址定容的研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):88-94.  
SUN S X, LI X M, LIU Z S, et al. Research on DG location and capacity of distribution network considering voltage stability evaluation [J]. Power system protection and control, 2019, 47(3): 88-94.
- [11] GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, VICINO A, et al. Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks [J]. IEEE transactions on smart grid, 2017, 8(6): 2859-2870.
- [12] 徐迅,陈楷,龙禹,等.考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J].电网技术,2013,37(4):914-921.  
XU X, CHEN K, LONG Y, et al. Location and capacity planning of micro-grid multi-type distributed power supply considering environmental cost and timing characteristics [J]. Power system technology, 2013, 37 (4): 914-921.
- [13] 夏澍,周明,李庚银.分布式电源选址定容的多目标优化算法[J].电网技术,2011,35(9):115-121.  
XIA Y, ZHOU M, LI G Y. Multi-objective optimization

- algorithm for location and capacity selection of distributed power sources[J]. Power system technology, 2011, 35(9): 115-121.
- [14] 庄园, 王磊. 分布式电源在配电网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.  
ZHUANG Y, WANG L. Research on optimized location and capacity determination of distributed power sources in distribution networks[J]. Power system protection and control, 2012, 40(20): 73-78.
- [15] 卓煜, 陈维荣, 戴朝华. 基于灵敏度分析的主动配电网无功电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 21-27.  
ZHUO Y, CHEN W R, DAI C H. Reactive voltage control of active distribution network based on sensitivity analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29 (5): 21-27.
- [16] 黄际元, 杨俊, 黎淑娟, 等. 电池储能系统参与配电网调峰的选址定容方法[J]. 电器与能效管理技术, 2018 (17): 18-23.  
HUANG J Y, YANG J, LI S J, et al. Method for selecting and determining the location of battery energy storage system participating in peak regulation of power distribution network [J]. Electrical appliances and energy efficiency management technology, 2018 (17): 18-23.
- [17] 高锋阳, 乔垚, 杜强, 等. 考虑光伏出力相关性的配电网动态无功优化[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 101-109.  
GAO F Y, QIAO Y, DU Q, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution networks considering the correlation of PV output [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39 (1): 101-109.
- [18] 曹生让, 丁晓群, 王庆燕, 等. 基于反向云自适应粒子群算法的多目标无功优化[J]. 中国电力, 2018, 51 (7): 21-27.  
CAO S R, DING X Q, WANG Q Y, et al. Multi-objective reactive power optimization based on reverse cloud adaptive particle swarm optimization [J]. Electric power, 2018, 51(7): 21-27.
- [19] 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (25): 90-96.  
LI J F, ZHANG B H. Improved probabilistic power flow calculation of Latin hypercube sampling based on evolutionary algorithms [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 90-96.

## OPTIMIZATION AND EVALUATION METHOD OF GRID-CONNECTED DISTRIBUTED POWER SUPPLY CONSIDERING SOURCE-STORAGE CHARACTERISTICS

Zhang Yonghui<sup>1</sup>, Zhang Yapu<sup>2</sup>, Pan Chao<sup>2</sup>, Lu Li<sup>2</sup>, Luo Yuanxiang<sup>2</sup>, Bao Feng<sup>1</sup>

(1. Songhuajiang Hydropower Co., Ltd. Jilin Baishan Power Plant, Jilin 132012, China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology of Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The randomness and fluctuation of output of wind turbines and photovoltaics make it be more difficult to coordinate power supply. To solve this problem, a staged optimization and evaluation method is used to study the distribution network configuration of distributed power including wind turbines and photovoltaics. In the first stage, the load active power loss sensitivity is considered to determine the location and capacity of the wind and photovoltaic power. In the second stage, the location of the energy storage battery is determined under the goal of minimizing network loss, and then a multi-objective function is established by comprehensively considering investment cost, voltage stability, and wind and photovoltaic curtailment rate. In addition, the simulated annealing-particle swarm optimization algorithm is used to optimize the energy storage capacity. In the third stage, the uncertainty of output of wind turbines and photovoltaics is considered, and the probabilistic power flow is used to evaluate the voltage and grid loss before and after the energy storage stabilization. Finally, combined with an actual distribution system in Northeast China for simulation analysis, the correctness and effectiveness of this method are verified.

**Keywords:** distributed power; optimization algorithm; location; probabilistic power flow; wind-solar-storage