

DOI: 10.7667/PSPC160772

## 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法

刘故帅<sup>1</sup>, 肖异瑶<sup>2</sup>, 贺禹强<sup>2</sup>, 涂文标<sup>1</sup>, 吴子阳<sup>1</sup>, 张忠会<sup>1</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学前湖学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 提出通过优化供应侧的新能源设备选型来应对当前电力系统双侧随机问题的新思路。针对不同类型新能源设备的成本、收益以及容量不同, 给配电网带来过度投资、电压降落和网损增加等问题, 建立了多目标优化数学模型。基于精英保留策略的多参数遗传算法, 考虑配电系统总投资收益率、系统网损以及系统节点电压偏移量, 得到新能源并网决策的帕累托最优解空间。通过规格化处理转变为单目标函数, 得到整体最优并网策略。以 IEEE-30 节点系统为例进行模拟分析, 验证了所提方法的合理有效性, 为供应侧新能源设备选型提供了一定的参考。

**关键词:** 新能源; 多目标优化; 帕累托最优; 遗传算法

### Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system

LIU Gushuai<sup>1</sup>, XIAO Yiyao<sup>2</sup>, HE Yuqiang<sup>2</sup>, TU Wenbiao<sup>1</sup>, WU Ziyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhonghui<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Qianhu, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** A concept of optimizing the grid connected new energy is proposed to cope with the bilateral randomness problem of power system. In illusion to the problems such as excessive investment, voltage drop and the ascending loss of active power which are resulted from the differences in cost, revenue and capacity between various kinds of new energy. A mathematical model for multi-objective optimizing with the maximum rate of return on investments, the minimum power loss and the offset of node voltage as its objective is established which is based on the Genetic Algorithm (GA) with the elitist strategy and multi-parameters. This paper reaches Pareto optimal solution space of new energy decisions and the overall optimal strategy through normalized processing. Simulating analysis conducted with the instance of IEEE-30 node system verifies the rationality and validity of this method which could provide certain reference for the equipment selection for the new energy on the supply side.

**Key words:** new energy; multi-objective optimization; Pareto optimality; genetic algorithm

## 0 引言

风、光等新能源具有清洁、低碳、分散能源利用率高、灵活可靠等优点。新能源的应用越来越广泛, 除在遥远地区使用新能源设备更经济、可靠外, 新能源的推广和普及也是能源互联网建设的一个“入口”。

大规模新能源接入配电系统, 对气候环境<sup>[1]</sup>、配电网的多个运行状态<sup>[2-4]</sup>、经济收益率<sup>[5-6]</sup>均会产生不可忽视的影响。通过对新能源的接入位置和容量进行合理规划, 可以减轻甚至消除新能源接入的不良影响<sup>[7]</sup>。目前传统的新能源优化规划中, 多为考虑风电场<sup>[8-9]</sup>或者光伏机组<sup>[10-12]</sup>单目标并网规划,

且没有考虑新能源设备的不同类型。随着电力市场的迅速发展, 电力系统逐渐由“单侧随机系统”转变为“双侧随机系统”<sup>[13]</sup>, 供应侧不再是传统的单一可控的供应系统, 除大电网外, 将包括风、光等新能源设备, 按照不同的并网策略与不同的配电网及用户签订受电力市场保护的并网合同, 供应侧逐渐成为一个随机系统。目前, 各国在电力体制改革中, 交易策略引入的次序、程度存在较大差别, 国内电力市场并网竞争机制及现货交易尚未完全形成<sup>[14]</sup>。供应侧如何合理选择新能源的并网对象成为一个亟待解决的问题。

电力市场波动过程中, 在满足电网运行网损、节点电压的指标前提下, 配电网的各方收益率对新

能源的选择提出了较高的要求,也成为新能源并网决策的关键因素。本文基于精英保留策略的多参数遗传算法,以新能源类型及容量作为并网决策变量,提出了以配电系统总投资收益率最大、系统网损最小、系统节点电压偏移量最小为目标的多目标数学模型,得到一系列均匀分布的帕累托最优解,然后将各目标函数值进行规格化处理,构造无量纲的单一目标函数,从而在避免主观权值以及多目标折中取值的情况下,得到新能源类型、容量的最优策略解,最后计算最优策略解的帕累托端点,验证最优策略解的合理性。以 IEEE-30 节点系统并网决策优化为例进行模拟分析。

## 1 新能源多目标数学模型

### 1.1 多目标函数

新能源合理接入是提高配电系统电能质量、供电可靠性的重要举措之一<sup>[15]</sup>,建立开放、公平竞争的电力市场体系,是保证新能源在供应侧发挥最大效用的有效经济手段<sup>[16]</sup>。本文从配电系统总投资收益率、系统网损和系统节点电压偏移量 3 个方面为电力系统选择新能源并网对象提供参考依据。目标函数的数学表达式为

$$\max C_y = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{out}} \quad (1)$$

$$\min P_{loss} = P_{loss}^{Lines} + P_{loss}^{Transformers} \quad (2)$$

$$\min \Delta U = \sum_{i=1}^N \left( \frac{U_i - U_i^{spec}}{U_i^{spec}} \right)^2 \quad (3)$$

$$C_{out} = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_j^{N_e} SW_i [(C_{eq,j} \cdot (P/A, r, t) + C_{op,j}) P_j + C_{set,i}] \quad (4)$$

$$C_{in} = 8760 \sum_i^{N_n} \sum_j^{N_e} SW_i (C_{sub,j} + C_{p,j}) P_j \quad (5)$$

$$(P/A, r, t) = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (6)$$

$$P_{loss}^{Lines} = \sum_{k=1}^{N_n} G_{k(i,j)} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$P_{loss}^{Transformers} = \sum_{i=1}^{N_t} SW_i I_i^2 R_i \quad (8)$$

式中:  $C_y$  表示配电系统在新能源机组的生命周期内每年的总投资收益率;  $C_{in}$  表示配电系统每年的综合收益;  $C_{out}$  表示配电系统每年的综合支出费用;  $SW_i$  取值为 0 或 1,  $SW_i = 0$  表示节点  $i$  不安装新能源机组,  $SW_i = 1$  表示节点  $i$  不安装新能源机组;  $t$  为新能源机组的使用年限;  $r$  为贴现率;  $N_n$ 、 $N_e$  分

别表示节点总数与参与并网决策的新能源机组总数;  $C_{op,j}$  和  $C_{eq,j}$  分别为第  $j$  个新能源机组每年的运行维护成本(万元/kW·h)和投资成本(万元/kW·h),  $C_{set,i}$  表示第  $i$  个节点安装成本(万元);  $C_{sub,j}$ 、 $C_{p,j}$  分别为第  $j$  个新能源机组政府补贴电价与上网电价;  $(A/P, r, t)$  为等年值现值系数;  $P_j$  表示新能源机组的额定容量;  $N_t$  表示配电系统原有发电机数量;  $P_{loss}$  表示配网系统中全部有功网损,包括线路损耗  $P_{loss}^{Lines}$  和变压器损耗  $P_{loss}^{Transformers}$ ;  $N_t$  表示支路数;  $U_i$ 、 $U_j$  分别表示节点  $i$  与节点  $j$  的电压幅值;  $G_{k(i,j)}$  表示节点  $i$ 、 $j$  之间支路  $k$  的电导;  $\cos \delta_{ij}$  表示节点  $i$ 、 $j$  的电压相位差;  $I_i$  表示流经节点  $i$  的电流;  $R_i$  表示发电机内阻;  $\Delta U$  表示节点电压偏移量;  $U_i$  表示节点实际电压;  $U_i^{spec}$  表示节点期望电压。

### 1.2 约束条件

电力系统中有功出力必须满足需求侧的负荷需求才能保证电力系统的正常运行,如式(9)所示;每台发电机组都有自己的出力上下限,如式(10)所示;各个节点均有功率上限限制,同一个节点所接入的新能源的有功功率不能超过其上限值,即配电系统节点受最大消纳能力限制,如式(11)所示。

$$\sum_{j=1}^{N_e} P_j + \sum_{i=1}^{N_t} P_i - D = 0 \quad (9)$$

$$P_{k,min} \leq P_k \leq P_{k,max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (11)$$

式中:  $N_e$ 、 $N_t$  分别表示参与并网决策的新能源机组总数和配电系统原有发电机数量;  $P_j$  为第  $j$  个新能源机组的额定功率;  $P_i$  表示配电系统电源节点  $i$  输出的有功功率;  $D$  为配电系统总负荷。  $P_{k,max}$ 、 $P_{k,min}$  表示机组  $k$  的出力上下限;  $P_{i,max}$  表示节点  $i$  的功率上限。

## 2 新能源并网决策

### 2.1 基于遗传算法的并网决策思路

假设  $N_a$  个新能源机组参与并网,配电系统选择其中  $N_e$  个机组,节点数为  $N_n$ ,则共有  $A_{N_e}^{N_a} C_{N_a}^{N_e} C_{N_n}^{N_e}$  种并网策略。以综合收益率、系统网损和节点电压偏移量为并网条件,通过不断迭代获取新的并网策略,以适应度函数作为选择判据,以精英保留策略提高算法优化性能,最后以帕累托前沿验证最优策略的合理性。

## 2.2 多参数级联编码

### 1) 编码

本文并网策略共有  $2N_e$  个参数, 分别假设为  $\mathbf{a}_i$  (其中  $i \in 2N_e$ ), 每个参数  $\mathbf{a}_i$  用  $l_i (l=1, 2, \dots, n)$  位二进制编码可用式(12)来表示, 假设种群大小为  $s$ , 则第  $s$  个并网策略  $\mathbf{x}_s$  可用式(13)来表示, 群体  $\mathbf{pop}$  矩阵可用式(14)表示。

$$\mathbf{a}_i = [a_{i1} a_{i2} \dots a_{il_i}] \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_s = [a_1^s, a_2^s, \dots, a_i^s, \dots, a_{2N_e}^s] \quad (13)$$

$$\mathbf{pop} = [\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_s]' \quad (14)$$

式中,  $\mathbf{x}_s$  为  $1 \times \sum_{j=1}^{2N_e} l_j$  阶矩阵, 表示第  $s$  个种群的二进制矩阵, 从而得到不同并网策略的二进制编码。

需要特别说明的是, 个体的  $1-N_e$  个参数表示参与并网决策的新能源方编号,  $(N_e+1)-2N_e$  个参数表示参与并网的配电系统节点编号。其安装对应关系如图 1 所示。

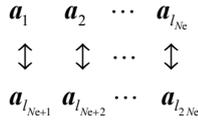


图 1 并网决策中新能源与系统节点对应关系

Fig. 1 Correspondence between new energy and system nodes in the trading strategies

### 2) 参数越限处理

二进制编码需要做约束处理, 判断依据为

$$\sum_{l_j=1}^{N_e} 2^{\wedge} a_{l_j} > N_a \quad (15)$$

$$\sum_{l_j=N_e+1}^{2N_e} 2^{\wedge} a_{l_j} > N_n \quad (16)$$

即随机或经过交叉变异得到的群体中个体的参数大于新能源设备编号最大值或系统节点编号最大值, 则需要进行约束, 本文参数约束方式为将越限的参数重新赋一个不越限的随机整数。

## 2.3 精英保留策略

群体中的个体通过选择、交叉和变异操作, 可以不断产生新的个体, 但也可能会将上次迭代中出现的适应度最高的优秀个体破坏, 从而降低遗传算法的运行效率。本算法采用精英保留策略, 将上一次迭代产生的最优个体保留, 替换掉本次迭代出现的适应度最低的个体, 但上次迭代保留的最优个体也参与选择、交叉、变异的操作, 即保证了群体的多样性, 同时也避免迭代中出现的优秀个体被破坏。

## 2.4 构建适应度函数

目前, 求解多目标函数最优解的方法有很多。可以通过修正的权重, 将各个目标统一成单目标函数<sup>[17]</sup>, 由决策者直接从帕累托前沿中主观选取一个的最优解<sup>[18]</sup>。权重的制定需要考虑并网双方甚至多方的共同利益, 权重的改变将关乎整个并网的公平性, 所以传统的修正法获得权重以及决策者从帕累托前沿折中获取最优并网方案, 均不能从根本上保证公平性。本文将每个目标的计算结果进行规格化处理, 保证各个目标值之间不受量纲影响, 然后获得综合目标函数值, 此方法可以同时考虑所有并网方的利益, 避免主观因素影响。规格化处理公式:

$$f' = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (17)$$

式中:  $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$  分别表示最大、最小目标函数值,  $f'$  表示规格化处理后的目标函数值, 遗传算法中的每次迭代均得到各个目标函数的规格化值。将优化目标求最小值的函数通过式(18)转换为最大值问题, 适应度函数如式(19)所示。

$$\bar{f}(X) = E - f'(X) \quad (18)$$

$$F(X) = f'_c(X) + \bar{f}_{\text{Ploss}}(X) + \bar{f}_{\text{Voff}}(X) \quad (19)$$

式中:  $f'_c(X)$  表示系统总投资收益率的规格化矩阵;  $\bar{f}_{\text{Voff}}(X)$  和  $\bar{f}_{\text{Ploss}}(X)$  分别表示系统网损和系统节点电压偏移量的规格化值转换矩阵;  $E$  表示全为 1 的  $s \times 1$  阶矩阵。

## 2.5 帕累托前沿解空间验证

多目标决策时, 为较好地满足所有的目标, 需要不断的迭代, 而帕累托最优处在一种不可能有改进余地的最优状态<sup>[19]</sup>。当考虑系统总投资收益率、系统网损和系统节点电压偏移量进行多目标优化时, 得到帕累托前沿曲线  $C(f'_c, \bar{f}_{\text{off}}, \bar{f}_{\text{ploss}})$ , 曲线  $C$  中任意一点在具有博弈关系的各目标之间拥有最小的冲突, 为并网决策提供了一个可选择解空间。

## 2.6 算法流程

1) 信息初始化: 包括配电系统发电机、线路、节点的基本数据以及各节点的安装费用  $C_{\text{set},j}$  等信息; 参与并网的新能源机组的额定容量  $P_j$ 、上网电价  $C_{p,j}$ 、维修费用  $C_{\text{op},j}$  及投资成本  $C_{\text{ep},j}$  等信息; 遗传算法迭代次数  $g$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、贴现率  $r$ 、设备使用年限  $t$  等参数信息及随机产生种群大小为  $s$  的群体  $\mathbf{pop}$ , 并进行参数越限处理。

2) 适应度计算: 对种群  $\mathbf{pop}$  的每个个体进行潮流计算, 得到种群  $\mathbf{pop}$  每个个体的适应度, 保留其中最佳个体。

3) 进行遗传算子操作：对种群  $pop$  进行选择、交叉和变异，得到子代种群  $pop'$ ，并进行参数越限处理。

4) 适应度计算及结束判断：计算新种群  $pop'$  中每个个体的适应度函数值，并选出最差个体，由父代种群中的最佳个体替代。判断是否达到最大迭代限制，否则转入步骤 3)，实现群体内个体信息的深度交换，获得新个体；是则输出最优并网策略。并网决策优化流程如图 2 所示。

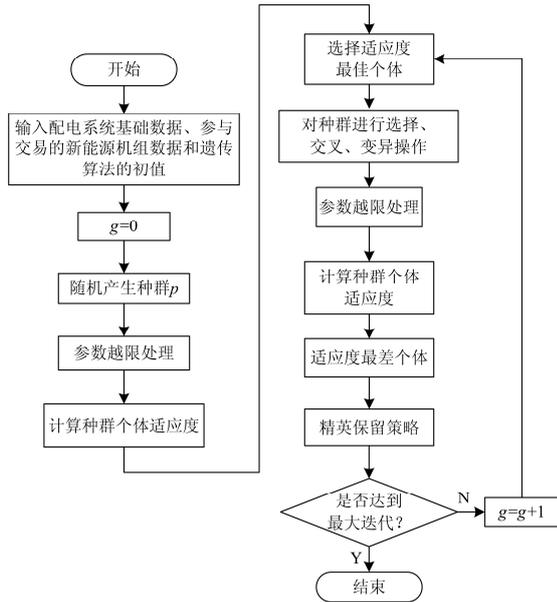


图 2 决策优化流程

Fig. 2 Optimal process of decision

### 3 算例分析

本算例系统为 IEEE-30 标准节点系统，详见图 3，包括 6 台发电机，系统有功负荷为 283.4 MW，无功负荷为 126.2 Mvar，具体数据参见文献[20]。实际配电网不同节点具有不同的施工环境，即假设

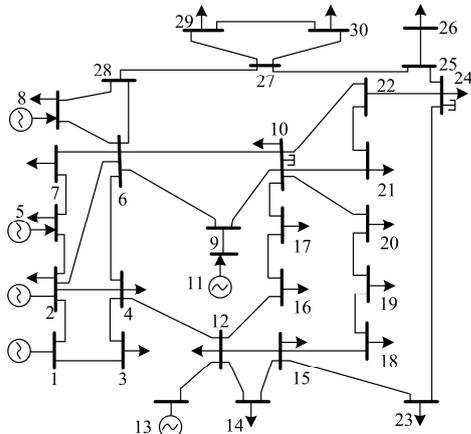


图 3 IEEE-30 节点系统接线图

Fig. 3 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

不同节点安装新能源设备费用不同，详见表 1。种群大小 100，迭代次数 200，交叉概率 0.9，变异概率 0.1，贴现率 0.1，新能源设备生命周期 20 年，电力系统参与并网决策的新能源设备相关参数详见表 2，其中设备 1-8 号为光伏设备，9-16 号为风能设备。

表 1 节点安装新能源设备费用

Table 1 Installed cost of new energy equipment

节点	安装费用/ 万元	节点	安装费用/ 万元	节点	安装费用/ 万元
1	11.10	11	11.67	21	8.83
2	10.17	12	11.50	22	14.23
3	8.40	13	9.02	23	13.69
4	12.54	14	7.99	24	12.66
5	13.10	15	13.55	25	9.32
6	11.67	16	11.29	26	4.14
7	0.06	17	8.50	27	11.49
8	1.15	18	7.34	28	14.84
9	8.79	19	14.84	29	1.78
10	9.10	20	7.99	30	1.13

表 2 参与并网决策的新能源设备参数

Table 2 Parameters of new energy equipment involved in the trading decision

设备编号	单机组容量/ MW	投资成本/ (万元/kW)	上网电价/(元/ kWh)	运行维护费用/ (元/kW)	国家补助/(元/ kWh)
1	2.9	4.35	0.98	0.42	0.46
2	0.6	0.9	0.98	0.23	0.46
3	2.9	4.35	0.8	0.42	0.46
4	0.6	0.9	0.8	0.23	0.46
5	2.9	4.35	0.8	0.65	0.46
6	0.6	0.9	0.8	0.35	0.46
7	2.9	5.8	0.98	0.42	0.46
8	0.6	1.2	0.98	0.23	0.46
9	2.9	2.6	0.6	0.32	0.25
10	0.9	0.99	0.6	0.195	0.25
11	2.9	2.6	0.47	0.32	0.25
12	0.9	0.99	0.47	0.195	0.25
13	2.9	2.6	0.6	0.051	0.25
14	0.9	0.99	0.6	0.018	0.25
15	2.9	1.4	0.6	0.32	0.25
16	0.9	0.6	0.6	0.195	0.25

本算例并网策略共有 6 个参数，图 4 显示的是遗传算法搜索过程中个体的分布图(以电压偏移为例)，分别给出了初始群体、第 5、100、200 代的分布情况。图 4(a)中各个个体参数分布得比较均匀；图 4(b)中淘汰掉大量非优秀个体并出现大量次优点；图 4(c)中可以看出，次优点被大量淘汰；图 4(d)中可以看出，个体参数更加集中在最优点附近，说明遗传算法在处理多参数时是合理的。

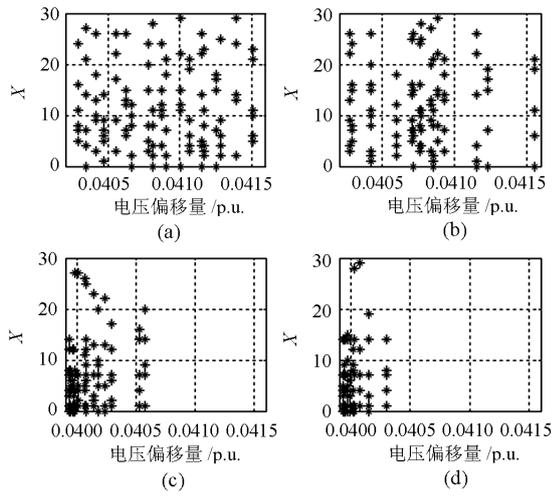


图 4 GA 搜索过程中个体参数分布图

Fig. 4 Distribution of individual parameters in the search process of GA

然后按照式(17), 对每次迭代得到的各目标函数值进行规格化处理, 得到 3 组 0-1 之间的数据, 按照式(19)得到适应度函数。

由遗传算法得到的新能源并网策略帕累托前沿解空间如图 5 所示, 图 5(a)表示初始种群的解空间, 图 5(b)表示第 200 代种群的帕累托最优解空间, 在一定的新能源设备容量范围内, 电压偏移量、系统网损和经济效益存在一定的博弈关系。

新能源并网策略收敛特性曲线如图 6 所示, 6 个参数在初始种群、第 5 代种群、第 100 代群体、第 200 代群体的分布情况如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知, 本文算法具有较强的搜索和收敛能力。

计算最优并网策略的帕累托端点, 映射到帕累托前沿解空间中, 如图 5(b)中的箭头所示。从而验证得到的最优并网策略满足帕累托最优。最优并网策略如表 3 所示。

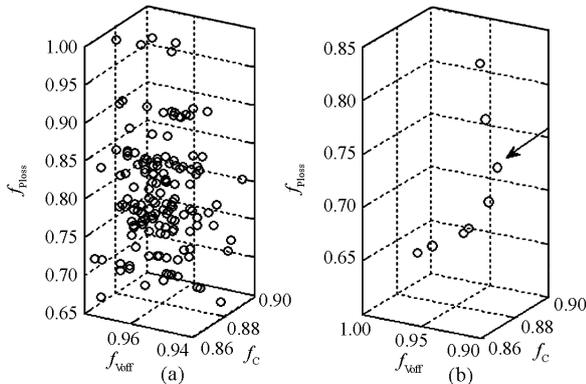


图 5 并网决策帕累托前沿解空间

Fig. 5 Solution space of Prato fronts in the strategies

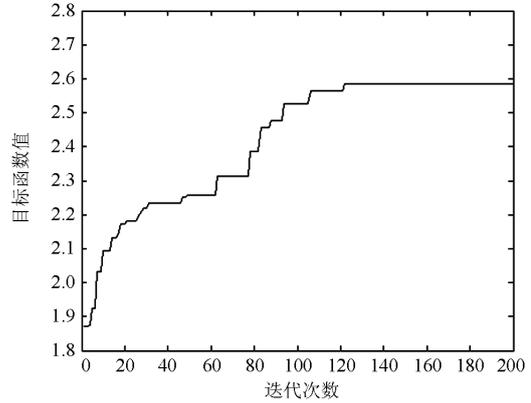


图 6 并网策略收敛特性曲线

Fig. 6 Performance characteristics of the strategies

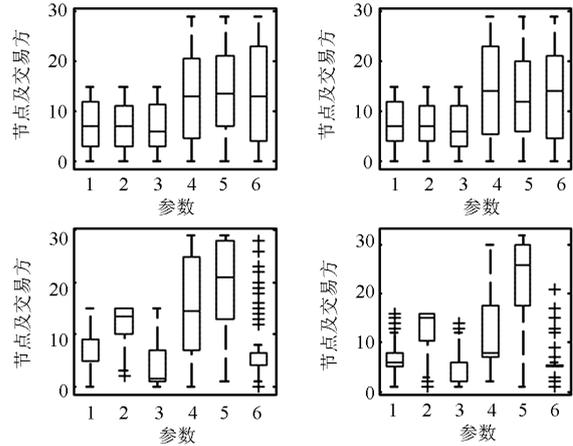


图 7 种群参数迭代分布图

Fig. 7 Distribution of parameters in the iteration process

表 3 新能源最优并网决策解

Table 3 Optimal strategy for new energy grid-connection

并网策略		最优策略各目标函数规格化值			
选择的新能源设备编号	选择的电力系统节点编号	有功网损	电压偏移量	经济效益	目标函数值
6, 16, 2	7, 30, 5	0.743	0.9474	0.894	2.586

由表 3 可知, 选择的新能源设备为 2、6、16, 可见小容量、运行维护费用低、设备投资费用低的新能源设备更受欢迎。设备分别接入系统 5、7、30 节点, MCQGA 法和 NSGA-II 法 IEEE-30 节点系统并网节点分别为 7、26、30 节点和 7、29、30 节点<sup>[6]</sup>, 可知本文算例并网节点与 IEEE-30 节点系统差距不大。

综上所述, 本文所建立的新能源并网优化模型能够依据新能源设备的容量、运行费用、设备投资费用等参数进行选择; 另一方面, 通过供应侧与新能源提供方之间的协调配合选择, 能够实现降低系统网损和系统节点电压偏移量, 提高系统总投资收益率的目的。

## 4 结论

1) 综合考虑了电力系统新能源并网的多种因素, 使得不同类型设备之间的辨识度较高;

2) 以配电系统总投资收益率最大、系统网损最小、系统节点电压偏移量最小为目标建立了新能源并网优化数学模型;

3) 采用多参数遗传算法对模型进行求解, 规格化处理得到满足适应度函数的最优并网策略, 并通过帕累托前沿解空间对模型结果进行了检验。

算例结果验证了本文所述并网优化方法的合理性, 为电力系统选择新能源设备提供了一定的参考意义。后续研究应集中在不同类型新能源设备的时间特性方面, 重点分析不同时间段下如何选择不同类型新能源设备的出力策略。

## 参考文献

- [1] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊): 346-351.  
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [2] MAHBOUBI-MOGHADDAM E, NARIMANI M R, KHOOBAN M H, et al. Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 76: 35-43.
- [3] 魏刚, 范雪峰, 张中丹, 等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响及对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.  
WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 135-141.
- [4] DAHAL S, SALEHFAR H. Impact of distributed generators in the power loss and voltage profile of three phase unbalanced distribution network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 77: 256-262.
- [5] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 85-91.  
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 85-91.
- [6] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 86-94.
- [7] 袁蓓. 基于植物发电技术的分布式发电系统容量规划[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 92-97.  
YUAN Pei. The capacity planning of distributed power generation system based on plant power generation technology[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 92-97.
- [8] 张程飞, 黄俊辉, 谢珍建, 等. 电网风电接纳能力评估方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 99-105.  
ZHANG Chengfei, HUANG Junhui, XIE Zhenjian, et al. A review on evaluation methods of power grid's wind power accommodation capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 99-105.
- [9] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.  
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.
- [10] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.  
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [11] 张沈习, 程浩忠, 李珂. 考虑相关性的风力发电机组多阶段选址定容规划[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 53-59.  
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, LI Ke. Multistage planning for wind turbine generator considering correlations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 53-59.
- [12] 邓健, 王壮壮, 袁在忍, 等. 基于物元可拓模型的光伏发电综合效益评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 117-125.  
DENG Jian, WANG Zhuangzhuang, YUAN Zairen, et al. Comprehensive benefit evaluation of photovoltaic power generation based on matter element extension model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 117-125.
- [13] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,

- 2016, 36(2): 102-111.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between "generation-grid-load-energy storage" and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [14] 马莉, 范孟华, 郭磊, 等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.
- MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9.
- [15] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
- ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [16] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.
- [17] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.
- LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.
- [18] 栗然, 马慧卓, 祝晋尧, 等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.
- LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.
- [19] 李鸿鑫, 李银红, 陈金富, 等. 自适应选择进化算法的多目标无功优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 71-78.
- LI Hongxin, LI Yinhong, CHEN Jinfu, et al. Multiple evolutionary algorithms with adaptive selection strategies for multi-objective optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 71-78.
- [20] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007: 325-328.

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-09-18

作者简介:

刘故帅(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动检测与控制; E-mail: family\_2012@163.com

肖异瑶(1997-), 女, 本科, 助教, 主要研究方向为电力系统自动检测与控制; E-mail: 472799723@qq.com

贺禹强(1997-), 男, 本科, 助教, 主要研究方向为电力系统自动检测与控制。E-mail: 1347230518@qq.com

(编辑 姜新丽)