

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222536

# 省级电网最大供电能力优化调度研究

黄牧涛<sup>a</sup>, 陈兴邦<sup>a</sup>, 高素花<sup>b</sup>, 陈杰<sup>b</sup>, 周胡钧<sup>a</sup>

(华中科技大学 a. 电气与工程学院; b. 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 高比例新能源接入电网后, 电网安全稳定受多重不确定性因素的影响显著提升, 为在新能源大幅度波动造成功率缺口的场景下快速形成功率调整方案以维持源—网—荷动态平衡, 亟需量化评估电网的最大供电能力。为此, 以供电能力最大、重要断面最小断面裕度最大作为优化目标函数, 以电量平衡、片区备用容量、断面裕度作为约束条件建立省级电网最大供电能力评估场景模型, 分别采用多阶段的约束多目标进化(CMOEA-MS)算法和带精英策略的快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解模型, 并基于解集的收敛性、均匀性、广泛性 3 个指标对两种算法的解集质量进行评价。算例仿真结果表明, CMOEA-MS 算法在求解所提模型时超体积极值更大、性能更好, 能有效提高省网的最大供电能力。

**关键词:** 最大供电能力评估; 多目标优化模型; 多阶段的约束多目标进化算法; 超体积极值; 省级电网

**中图分类号:** TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0216-05

## 1 引言

省级电网是一个非线性的高维复杂系统, 具有联络通道复杂、不确定性因素随机性强的特点, 因此优化发电机机组运行出力、合理安排联络线计划、充分利用断面裕度信息、挖掘电网供电潜能成为电网实际运行中亟需解决的问题。电力系统的优化调度问题通常是满足功率平衡、系统安全、等约束下, 选择需要改善的方面(如系统运行经济性, 新能源消纳量)作为优化目标建立单目标或多目标优化模型, 使得目标达到最优或帕累托最优的带约束的优化问题<sup>[1]</sup>。目前, 基于现代电力系统的运行特性, 关于多目标电力系统优化调度模型方面的研究已较多, 如蒋承刚等<sup>[2]</sup>考虑了常规机组发电成本和环境污染的影响建立了多目标优化模型; 赵亚威<sup>[3]</sup>综合考虑了发电成本及清洁能源弃电量两方面建立多目标优化调度模型; 刘彦辉<sup>[4]</sup>则从各类型电源发电成本及光伏电站出力预测误差两方面出发建立多目标优化调度模型。既有多目标调度模型多是从新能源消纳角度出发, 而针对省网最大支援能力优化调度的研究较少。为此, 本文梳理了省网最大支援能力评估场景, 考

虑供电能力最大、重要断面最小裕度最大两个调度目标, 考虑电量平衡、片区备用容量限制、重要断面的断面裕度限制三种约束建立最大供电能力评估场景模型, 并结合模型自身特性, 分别采用 CMOEA-MS 与 NSGA-II 算法对模型进行智能求解, 量化评估大电网最大供电能力, 最后基于电网实际运行数据验证了模型有效性。

## 2 最大供电能力评估场景模型构建

### 2.1 场景定义

现有省网 A 以外的地区由于自然灾害、新能源出力异常波动等因素出现供电能力不足的情况, 需通过调整省网 A 区域内的各片区的常规机组出力以供给出现电量缺额的地区, 假设在省网 A 区域内各片区不采取有序用电、机组启停方式不变的情况下, 根据当前负荷水平及水电、火电、抽蓄等机组备用情况、新能源功率预测信息及负荷预测信息估算该省网的最大供电能力, 在确保省网 A 安全稳定运行的情况下估算其最大供电能力。将省外电网的缺电量等效为省网各片区的负荷增长量, 并假设各片区的负荷按各片区当前时刻的负荷之比增长。

**收稿日期:** 2022-11-05, **修回日期:** 2022-12-14

**基金项目:** 国家电网有限公司总部管理科技项目(5400-202199555A-0-5-ZN)

**作者简介:** 黄牧涛(1973-), 女, 博士、研究员, 研究方向为电力系统多能协调优化调度, E-mail: huangmutao@hust.

## 2.2 数学模型构建

### 2.2.1 目标函数

为充分发挥常规机组的调节性能,在能保证省网区域内各片区自身安全稳定运行的情况下提供尽可能多的电量,设置的目标函数为供电量最大和机组出力调整后的断面裕度的最小值最大。其目标函数为:

$$\begin{cases} \max f_1 = \sum_{i=1}^m \Delta L_i \\ \max f_2 = \min \begin{cases} P_m^{\text{re}} - P_{m,\text{down}} & P_m^{\text{re}} < 0 \\ P_{m,\text{up}} - P_m^{\text{re}} & P_m^{\text{re}} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta L_i$  为第  $i$  个片区的当前负荷增长量;  $P_m^{\text{re}}$  为调整后的断面功率;  $P_{m,\text{up}}$ 、 $P_{m,\text{down}}$  分别为断面  $m$  输送功率的最大值、最小值。

### 2.2.2 约束条件

(1) 电量平衡约束。电量平衡约束为等式约束,表示各片区新能源消纳量的总和等于各片区出力调整量的总和。即:

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = \sum_{i=1}^n \Delta L_i \quad (2)$$

式中,  $\Delta P_i$  为片区  $i$  的功率调整量。

(2) 备用容量约束。备用容量约束为不等式约束,表示存在正备用片区功率的调整值小于正备用的上限(根据新能源功率预测和负荷预测的结果对实时的正备用上限进行修正得到)。即:

$$\Delta P_i \leq R_i \quad (3)$$

式中,  $R_i$  为正备用容量。

(3) 断面稳定约束。片区的机组出力调整时,关键输电断面的功率值也会随之产生变化,所以为保证进行省间供电时关键输电断面安全稳定,应当确保调整后的关键输电断面功率处于断面限额的上下限范围内。即:

$$P_q + \sum_{i=1}^n S_{iq} \Delta P_i - \sum_{i=1}^n \left( S_{iq} \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \sum_{i=1}^n \Delta L_i \right) \leq P_{q,\text{max}} \quad (4)$$

$$P_q + \sum_{i=1}^n S_{iq} \Delta P_i - \sum_{i=1}^n \left( S_{iq} \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \sum_{i=1}^n \Delta L_i \right) \geq P_{q,\text{min}} \quad (5)$$

式中,  $n$  为具备消纳能力片区的个数(负备用不为零的个数),  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $P_{q,\text{max}}$ 、 $P_{q,\text{min}}$  分别为确保断面  $q$  稳定的功率上、下限;  $L_i$  为第  $i$  个片区的当前负荷值;  $S_{iq}$  为片区  $i$  对断面  $q$  的灵敏度。

在工程实际计算中,断面灵敏度  $S_{eG}$  采用下式近似计算:

$$S_{eG} = \frac{d}{dP_e} \sum_{i=1}^{M_G} P_{m_{Gi}, n_{Gi}} \quad (6)$$

式中,  $M_G$  为构成断面  $G$  的输电线路数量;  $i$  为线路编号;  $P_{m_{Gi}, n_{Gi}}$  为  $i$  的线路功率变化量;  $m, n$  为线路  $i$  的首、末节点;  $P_e$  为电厂  $e$  功率。

最大供电能力场景下约束条件为式(2)、(4)、(5)。

### 2.3 模型计算流程

本文构建的供电能力场景数学模型的计算步骤如下。

**步骤 1** 选取需评估最大供电能力的省网 A, 根据省网 A 分区情况, 将所有的片区整合成片区集  $I = \{\text{片区 1}, \text{片区 2}, \text{片区 3}, \dots, \text{片区 } i\}$  (假设总共有  $i$  个片区), 提取  $i$  个片区的实时负荷数据及预测负荷数据、正备用数据、负备用数据、新能源实时功率数据及预测数据, 然后结合新能源预测数据和负荷预测数据对正负备用数据进行修正。

**步骤 2** 根据经验选取省网 A 内需重点关注的断面集  $Q = \{\text{断面 1}, \text{断面 2}, \text{断面 3}, \dots, \text{断面 } N\}$ , 提取  $N$  个断面的当前时刻的功率值、断面稳定上限值、断面稳定下限值。

**步骤 3** 根据片区集  $I$  和断面集  $Q$ , 从分区备用容量监视系统中提取  $N \times I$  的灵敏度矩阵  $S$ 。

**步骤 4** 令迭代表示符  $k=0$ , 将步骤 1~3 中整理好的数据代入省网最大供电能力评估场景模型中进行计算。

**步骤 5** 根据计算得到的各片区的功率调整方案  $\Delta P_i$  及各片区按比例增长的负荷  $\Delta L_i$ , 对计算开始时刻的 QS 值进行修改, 然后将 QS 数据导入到在线安全分析系统, 计算各关键断面调整后的功率值  $P_{i,\text{QS}}^k$ 。

**步骤 6** 将步骤 5 中计算得出的各断面功率值  $P_{i,\text{QS}}^k$  与其断面稳定上限  $P_{i,\text{max}}^k$  和断面稳定下限  $P_{i,\text{min}}^k$  进行比较。若  $P_{i,\text{min}}^k \leq P_{i,\text{QS}}^k \leq P_{i,\text{max}}^k$ , 则结束迭代计算, 得到各片区功率调整方案, 省网 A 的最大供电能力、断面裕度的最小值; 若  $P_{i,\text{min}}^k > P_{i,\text{QS}}^k$ , 则考虑将优化模型中的断面下限功率  $P_{i,\text{min}}^{(k+1)}$  调整为  $P_{i,\text{min}}^k + P_{i,\text{min}}^k - P_{i,\text{QS}}^k$ ; 同理若  $P_{i,\text{QS}}^k > P_{i,\text{max}}^k$ , 则考虑将优化模型中的断面稳定上限功率  $P_{i,\text{max}}^{(k+1)}$  调整为  $P_{i,\text{max}}^k + P_{i,\text{QS}}^k - P_{i,\text{max}}^k$ 。

**步骤 7** 在迭代计算未结束的情况下, 令  $k = k + 1$ , 并返回至步骤 4 进行下一轮迭代计算。

## 3 多目标优化调度方案求解方法

### 3.1 多阶段的约束多目标进化算法

有约束的多阶段多目标进化算法(CMOEA\_

MS)的主要改进点在于其提出的两阶段搜索框架<sup>[5]</sup>。在每次迭代搜索中将搜索过程分为 I、II 两阶段,对于不同阶段采用不同的评价方法对当前子代是否满足约束,是否达到帕累托最优进行评价。两个阶段的转化通过比例  $\lambda$  控制,当种群中满足约束的子代数量所占比例小于  $\lambda$  时则进入 I 阶段,即子代满足约束的优先级等于子代目标最优的优先级,从而帮助非可行解的子代进入可行域,从而提高子代可行解的数量;反之则进入阶段 II,此时约束优先级高于目标最优,从而尽可能的找到满足约束的子代并使之在可行域内分布尽可能广泛,从而促进子代寻优。

解的适应度计算方法为:

$$f(x) = \sum_{y \in S_x} |R_y| + \frac{1}{D(x, x') + 2} \quad (7)$$

式中,  $R_y$  为所有被  $y$  所支配的解的集合;  $S_x$  为所有支配  $x$  的解的集合;  $x'$  为距离  $x$  最近的第  $\sqrt{2n}$  个可行解;  $D(x, x')$  为  $x$  与  $x'$  之间的欧氏距离。

式(7)表明适应度值越小,可行解的质量越好,若适应度的值小于 1,则表示该可行解为非支配解。

求解适应度的最关键之处在于确定解之间的支配关系。对 A 阶段,CMOEA-MS 通过考虑以下两个新目标函数来确定解的支配关系:

$$\begin{cases} \min f'(x) = (S_{SDE}(x), C_{CV}(x)) \\ \text{s. t } x \in \Omega \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$S_{SDE}(x) = \min_{y \in P'(x)} \sqrt{\sum_{i=1}^m (\max\{0, f_i(y) - f_i(x)\})^2} \quad (9)$$

$$C_{CV}(x) = \sum_{i=1}^p \max\{g_i(x), 0\} + \sum_{j=1}^q |h_j(x)| \quad (10)$$

式中,  $S_{SDE}(x)$  为基于  $x$  与种群  $P$  中其他解之间的距离的基于最小位移的密度估计;  $P'\{x\}$  为种群中除  $x$  之外的其他解的集合;  $f_i(x)$  为目标函数值;  $C_{CV}(x)$  为所有违反  $x$  的约束的总个数;  $g_i(x)$  为不等式约束;  $h_j(x)$  为等式约束。

第一个目标函数  $S_{SDE}(x)$  基于解之间距离的最小位移的密度估计,从收敛性和多样性两个方面评估解的优劣。第二个目标函数  $C_{CV}(x)$  从约束条件的满足度方面评估解的优劣。所以 A 阶段可将目标的优化和约束的满足同等考虑。

对阶段 B,CMOEA-MS 通过使用约束优势原则来确定解的支配关系,具体的确定方式为:

$$\begin{cases} C_{CV}(x) = 0 \\ C_{CV}(y) = 0 \\ f_i(x) \leq f_i(y) \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \\ f_i(x) < f_i(y) \quad \exists i \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \text{ or } C_{CV}(x) < C_{CV}(y) \quad (11)$$

式(14)表明阶段 B 总倾向于选取违反约束条件较少的解或是在两个解违反约束条件数量一致时,基于传统的帕累托优势理论得到的最优解。多阶段的约束多目标进化算法计算流程见图 1。

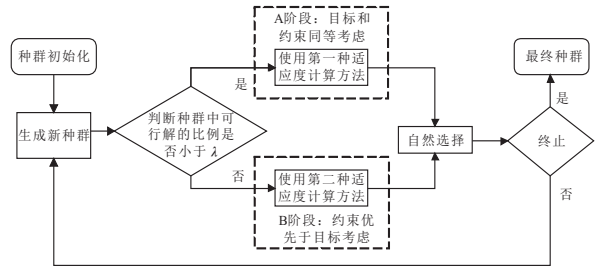


图 1 CMOEAMS 算法计算流程

Fig. 1 CMOEAMS algorithm calculation process

### 3.2 算法性能评价

本文主要从解集的收敛性(CP)、解集的均匀性(UP)、解集的广泛性(SP)3 方面评估对多目标进化算法的解集质量。Hypervolume 超体积指标<sup>[6-8]</sup>为解集质量评价指标,可在 Pareto 最优前沿未知的情况下兼顾这三方面对解集的质量进行评价。

Hypervolume 超体积指标计算方法为:

$$H_V(X, P) = \bigcup_{x \in X} \nu(x, P) \quad (12)$$

式中,  $X$  为非劣解集;  $x$  为非劣解集中的一个解;  $\nu(x, P)$  为解  $x$  与参考点  $P$  所构成的超立方体的体积。

当有两个目标函数时, Hypervolume 超体积指标计算方法步骤如下。

**步骤 1** 选取计算 Hypervolume 超体积指标的参考点,在最优前沿未知时通常取(1,1)。

**步骤 2** 根据参考点对非劣解集进行归一化处理,然后将非劣解集中的解在第一个目标函数上的值降序排列,再计算非劣解集对应的 Hypervolume 超体积指标:

$$H_V(X) = \sum_{i=1}^n |o_2(x_i) - o_2(P)| \cdot |o_1(x_i) - o_1(x_{i-1})| \quad (13)$$

式中,  $o_j(x_i)$  为非劣解集中的第  $i$  个解在第  $j$  个目标函数上的值;  $o_i(P)$  为第  $i$  个目标函数在参考点  $P$  处的值,且  $o_1(x_0)$  设置为  $o_1(P)$ 。

其值越大表明解集质量越好。

## 4 省网最大供电能力评估场景算例仿真

已知省网 A 有十个片区,本文以省网 A 作为研究对象,建立该省的最大供电能力场景评估模型,采用 CMOEA-MS 算法与 NSGA-II 算法分别求解模型并计算其超体积值进行比较,从而得到片区功率调整方案。基于 Platemo<sup>[9]</sup> 平台开展仿真,两种算法种群个数均为 100,迭代次数均为 10 000,CMOEA-MS 算法的  $\lambda$  参数设置为 0.5。

### 4.1 模型求解结果

(1) CMOEA-MS 算法求解结果。CMOEA-MS 求解省网最大供电能力评估场景模型所得的解集中共有 92 个非劣解,部分非劣解对应的目标函数值见表 1。部分非劣解对应的各片区的功率调整方案见表 2。

表 1 部分非劣解对应的目标函数值

Tab. 1 The objective function value corresponding to some non-inferior solutions MW

非劣解	负荷增长总量	断面调整后断面裕度的最小值	非劣解	负荷增长总量	断面调整后断面裕度的最小值
1	18 398.58	0.24	...	...	...
2	18 366.27	23.87	89	6 345.80	867.71
3	18 081.36	51.45	90	6 279.11	870.84
4	17 785.22	76.20	91	6 230.64	871.93
5	17 456.33	95.63	92	6 049.02	881.01

表 2 部分非劣解对应的片区功率调整值

Tab. 2 Area power adjustment corresponding to partial non-inferior solution MW

非劣解	1	2	3	...	91	92
片区 1	2 186.60	2 284.00	2 284.00	...	0.00	0.00
片区 2	718.00	594.30	400.00	...	1.20	0.00
片区 3	10 050.20	9 414.60	9 381.70	...	320.20	0.00
片区 4	560.90	562.00	564.70	...	575.00	575.00
片区 5	857.80	881.70	871.40	...	928.30	930.00
片区 6	705.60	706.10	728.10	...	734.20	732.70
片区 7	1 313.80	1 484.50	1 416.20	...	1 325.70	1 414.90
片区 8	274.40	781.70	813.20	...	1 248.20	1 323.80
片区 9	1 564.20	1 622.00	1 622.00	...	32.10	0.00
片区 10	167.00	35.40	0.00	...	1 065.80	1 072.60

(2) NSGA-II 算法求解结果。NSGA-II 求解省网最大供电能力评估场景模型得到的解集中有 82 个非劣解,少于 CMOEA-MS 所得到的非劣解数量。部分非劣解的目标函数值见表 3。所有非劣解所对应的各片区的功率调整方案见表 4。

(3) Hypervolume 超体积指标计算结果。采用本文评价方法,结合 CMOEA-MS、NSGA-III 算

表 3 非劣解对应的目标函数值

Tab. 3 The objective function value corresponding to the non-inferior solution MW

非劣解	负荷增长总量	断面调整后断面裕度的最小值	非劣解	负荷增长总量	断面调整后断面裕度的最小值
1	18 695.44	18.36	...	...	...
2	18 570.56	31.30	79	6 535.38	859.13
3	18 491.79	46.34	80	6 363.71	867.67
4	18 483.37	49.03	81	6 225.87	875.50
5	18 265.24	66.45	82	6 193.02	879.08

表 4 非劣解对应的片区功率调整值

Tab. 4 Area power adjustment corresponding to non-inferior solution MW

非劣解	1	2	3	...	81	82
片区 1	2 225.30	2 205.30	2 205.30	...	9.60	16.20
片区 2	744.00	744.00	709.50	...	4.10	4.10
片区 3	8 602.20	8 601.30	8 602.20	...	39.50	39.50
片区 4	574.80	577.00	574.70	...	573.70	573.70
片区 5	927.40	929.30	929.70	...	930.00	930.00
片区 6	733.10	728.80	730.90	...	733.70	733.70
片区 7	1 475.20	1 453.80	1 309.60	...	1 467.00	1 468.90
片区 8	1 654.00	1 654.00	1 654.00	...	1 379.80	1 338.50
片区 9	475.40	406.30	482.30	...	136.20	136.20
片区 10	1 284.10	1 290.90	1 293.70	...	952.20	952.20

法求解结果,分别计算 CMOEA-MS、NSGA-II 两种算法的 Hypervolume 超体积指标值为 0.672、0.634。

由此可知,CMOEA-MS 的 Hypervolume 值比 NSGA-II 大 6%,说明综合解集的收敛性、分布的广泛性和均匀性三方面 CMOEA-MS 算法获得的解集质量更高。因此将 CMOEA-MS 算法的计算结果作为省网最大供电能力评估场景的调度方案,部分调度方案见图 2。

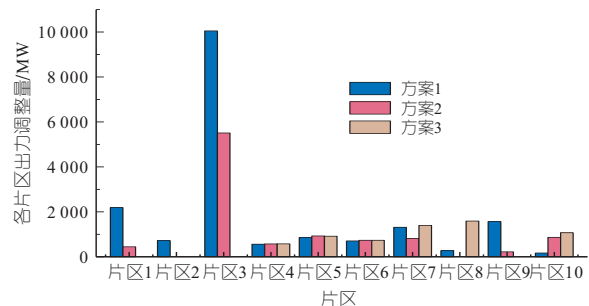


图 2 省网最大供电能力评估场景各片区出力调整方案  
Fig. 2 The output adjustment scheme of each area in the maximum power supply capacity evaluation scenario of provincial network

### 4.2 结果分析

根据表 1、3 的数据可知,无论是 CMOEA-MS 算法或 NSGA-II 算法得到的调度方案集可使省网至少再提供 6 000 MW 的功率,充分利用了片区的备用容量,提高了省网的供电能力。由

图 2 可看出,方案之间的差异主要是各片区的功率调增量,方案 1、2 主要依靠调整片区 1、3 的功率达到输出省网最大供电能力的目标,观察各片区功率调整量可知,3 种方案的供电能力从高到低依次为方案 1、2、3,实际调度时可根据具体需要从三种方案中选择合适的方案进行调度。

## 5 结 论

a. 为量化评估电网的最大供电能力,建立了省级电网最大供电能力评估场景模型,分别采用多阶段的约束多目标进化(CMOEA-MS)算法和带精英策略的快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解模型,并用 Hypervolume 超体积指标评价解集质量。

b. 本文提出的模型能有效挖掘省级电网各片区的备用容量,在兼顾断面裕度的基础上,充分提高了省网的最大供电能力。

c. 与 NSGA-II 算法相比,采用 CMOEA-MS 算法求解模型解集的收敛性与分布性更优,可供调度人员依据电网实际选择的调度方案更多,同时实现了对片区备用容量的充分利用,最大程度保证了省网供电的稳定性,提高了供电的可靠性。

### 参考文献:

[1] 高羿晨. 基于多任务多目标算法的电力系统发电优

化调度研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.

[2] 蒋承刚, 熊国江, 陈锦龙. 基于改进非支配多目标差分进化算法的含风电-小水电电力系统动态环境经济调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(8): 1-9.

[3] 赵亚威. 多电源电力系统多目标优化调度与决策方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

[4] 刘彦辉. 含光伏发电的电力系统功率预测和动态环境经济调度研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.

[5] TIAN Y E, ZHANG YA JIE, SU YANSEN, et al. Balancing objective optimization and constraint satisfaction in constrained evolutionary multiobjective optimization[J]. Ieee transactions on cybernetics, 2021, 52(9): 9559-9572.

[6] 李珂. Hypervolume 指标及其在多目标进化算法中的应用研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.

[7] 郑金华, 李珂, 李密青, 等. 一种基于 Hypervolume 指标的自适应邻域多目标进化算法[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(2): 312-326.

[8] JIANG SIWEI, ZHANG JIE, ONG YEW-SOA, et al. A simple and fast hypervolume indicator-based multiobjective evolutionary algorithm [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2015, 45(10): 2202-13.

[9] TIAN Y E, CHENG RAN, ZHANG XINGYI, et al. PlatEMO: A matlab platform for evolutionary multi-objective optimization [educational forum] [J]. IEEE computational intelligence magazine, 2017, 12(4): 73-87.

## Research on Optimal Scheduling of Maximum Power Supply Capacity of Provincial Power Grid

HUANG Mu-tao<sup>a</sup>, CHEN Xing-bang<sup>a</sup>, GAO Su-hua<sup>b</sup>, CHEN Jie<sup>b</sup>, ZHOU Hu-jun<sup>a</sup>

(a. School of Electrical and Electronic Engineering; b. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** After a high proportion of new energy is connected to the grid, the grid security and stability are significantly increased by multiple uncertainties. In order to quickly form a power adjustment plan to maintain the source-grid-load dynamic balance under the scenario of power gap caused by large fluctuations of new energy, it is urgent to quantitatively evaluate the maximum power supply capacity of the grid. In this paper, the maximum power supply capacity and the minimum section margin of important sections are taken as the optimization objective functions, and the maximum power supply capacity assessment scenario of provincial power grids is modeled with power balance, slice reserve capacity, and section margin as the constraints, and the multi-stage constrained multi-objective evolution (CMOEA-MS) algorithm and the fast non-dominated ranking genetic algorithm NSGA-II with elite strategy are used to solve the model, respectively. The quality of the solution sets of the two algorithms is evaluated in term of three indexes of convergence, uniformity and extensiveness of the solution sets. The simulation results of example show that the CMOEA-MS model has larger super volume values and better performance in solving the model, and can effectively improve the maximum power supply capacity of the provincial grid.

**Key words:** maximum power supply capacity evaluation; multi-objective optimization model; multi-stage constrained multi-objective evolutionary algorithm; super volume value; provincial grid