



# 基于改进贪婪算法的多场景负荷组合优化

王岩<sup>1</sup>, 蒋静<sup>2</sup>, 何恒靖<sup>1</sup>, 高赐威<sup>2</sup>, 肖勇<sup>1</sup>

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 随着售电侧市场化竞争格局的逐步形成, 售电公司通过负荷组合优化, 在用户侧可以提高负荷率, 降低购电成本, 在供电侧可以提高设备利用率, 降低线路损耗, 提高电网安全运行水平和供电质量。针对不同发展阶段的售电公司如何根据电力负荷的互补性、多样性整合优化用户资源的问题, 首先基于用户负荷特性分析, 提出了分别在购电利益、交易电量及综合负荷率最大的场景下用户负荷组合优化模型。其次, 对贪婪搜索算法进行改进, 引入随机因子, 解决算法在初始估计和优化效果判定上的缺陷, 提高了算法求解的质量与精度。最后采用改进贪婪搜索算法求解不同场景下的组合优化模型, 验证了该算法在求解该组合优化问题时具有更强的搜索能力和适应性。

**关键词:** 电力市场; 负荷组合优化; 负荷率; 购电成本; 改进贪婪算法

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.201812087

## 0 引言

随着电力市场改革的深入, 售电侧逐步放开, 售电公司的数量以及参与市场交易的形式不断增加。从电力市场发展实践来看, 售电侧开放有助于降低用电成本, 优化能源结构, 改善电力系统的安全与经济运行<sup>[1]</sup>。电力负荷特性复杂多样, 不同类型的用户负荷具有多样性和互补性, 相同类型的用户负荷具有相似性和周期性, 对于售电公司而言, 如何在不同场景下构造最优负荷组合策略以适应不同发展阶段的售电公司需求是值得研究的问题。负荷组合优化是售电公司根据用户负荷曲线的多样性和互补性, 通过负荷的优化聚类 and 组合, 实现各用户负荷有功功率互补, 进而聚合某一售电区域负荷, 使得组合后的负荷特性满足其需求。同时进行负荷组合优化, 对于改善负荷特性, 实现削峰填谷、降低网络损耗和提高电网运行效率具有重要意义。

**收稿日期:** 2018-12-25; **修回日期:** 2019-08-19。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(基于空调负荷储能建模的负荷聚合与运行调度关键技术, 51577029, 计及不确定性的多时空尺度需求响应模型及应用研究, 51277028); 南方电网公司科技项目(基于用电数据价值挖掘的客户行为分析与增值服务关键技术研究, ZBKJXM20170079)。

由于中国售电侧发展依然处于起步阶段, 有关发电侧机组组合优化问题研究较多, 而负荷侧组合优化问题研究较少, 且主要是从配电网规划和重构的角度出发。文献[2]根据不同类型用户典型日负荷曲线, 研究变电站及馈线综合负荷优化问题, 建立了马尔科夫链的负荷组合优化模型, 进而改变系统综合负荷特性, 提高了系统综合运营效益。文献[3]根据负荷曲线的互补性和同时性, 建立供电片区内的负荷组合优化模型, 实现用户功率互补, 改善供电区的综合负荷特性。文献[4]根据负荷特性指标对负荷进行分类, 建立负荷组合优化模型, 使负荷特性曲线整体最优, 针对各类典型日负荷曲线, 提出基于变电站综合负荷优化模型的配电网规划方法, 提高了配电网的可靠性和经济性。文献[5-6]分别利用解空间划分算法和化学反应算法从配电网重构的角度对负荷进行优化再分配, 来达到降低网损, 或者均衡负荷的目的。文献[7]采用负荷组合匹配算法, 根据光伏分布式电源功率输出特性确定匹配负荷, 建立分布式电源发电曲线与负荷曲线的适应度模型, 进而确定微电网内各电源和储能设备的最优容量。文献[8]提出了一种基于需求侧管理的用户负荷组合优化方法, 将负荷聚类与需求侧管理相结合, 度量不同负荷的相似波动特性。



电力市场环境下,售电公司面临愈发激烈的售电竞争,由于不同阶段的发展策略不同,在开展用户负荷组合过程中,有不同的优化策略,需要构建满足不同发展阶段的负荷组合优化模型,以满足当前阶段发展需求。考虑用户与售电公司具有双向选择权,因此所开展的用户负荷组合优化是一个多轮的动态平衡过程。本文在该场景下从售电公司如何合理选择用户的角度,针对售电公司的不同发展阶段提出了一种市场环境下的多场景负荷组合优化模型,模型能较好地指导售电公司在不同场景下,根据需求对用户群组进行组合优化,实现不同用户负荷的功率整合,改善综合负荷特性,达到移峰填谷、降低配电网损耗的目的,提高售电公司运营效益。最后本文提出采用改进贪婪算法对模型进行求解。

贪婪算法来源于 0-1 背包问题,具有时间复杂度低、计算效率高、易于实现等优点<sup>[9]</sup>。贪婪算法已经被广泛应用在电力系统的故障诊断、负荷恢复优化<sup>[10]</sup>、网络重构等领域<sup>[11]</sup>。贪婪搜索算法实现的基本思路是,先给定所求问题的一个初始估计,在此基础上快速求得最优估计,当结果达到一定要求后,算法停止,将输出结果作为最优解<sup>[12]</sup>。因此,初始估计的确定与选择对贪婪搜索算法的影响很大,将直接影响算法所求最优解的近似效果。同时,贪婪搜索算法的最大问题是容易陷入局部最优,当算法计算到某一个点后,如果无法进一步优化,算法就在该点处停止,得出局部最优解。因此,本文通过设计合理的改进贪婪策略,改善了贪婪搜索算法容易陷入局部最优的问题,利用贪婪算法的灵活性,提出负荷组合优化策略,并引入随机因子,降低求解难度。

## 1 基于用户负荷特性的组合模型

### 1.1 用户负荷特性

假设某区域内,有意向参与负荷组合优化的用户有  $n$  家,已知各用户的负荷特性为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1T} \\ P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2T} \\ \vdots \\ P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nT} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{P}$  为所有待组合用户的负荷特性矩阵;  $\mathbf{P}_i$  为第  $i$  个用户的负荷特性向量;  $P_{it}$  为第  $i$  个用户第

$t$  个时刻的采样功率值,即用户的典型日负荷曲线上所采集到的各时刻具体负荷值, kW;  $T$  为用户负荷日采样总次数。

根据以上的用户负荷特性,可获得各用户的日负荷曲线,由此可作为用户负荷时序特征的直观表示<sup>[13]</sup>。为有效开展负荷优化组合,在进行用户负荷组合优化前可利用历史数据将负荷按所属行业与其负荷曲线综合分类<sup>[14]</sup>,使每类负荷的典型日负荷曲线更具代表性,进而对不同类别下的用户群组分别开展负荷组合优化研究,以提高组合优化的准确性<sup>[2]</sup>。

一般而言,生活用电和第三产业用电由于白天各用电时间段具有互补性(如居民生活用电和商务办公用电),其负荷特性白天变化比较平缓,夜间显著减小,凌晨时间段内将出现全天用电低谷;重工业用户用电由于三班作业且受分段电价政策影响,夜间将出现负荷高峰,负荷低谷分别出现在两个上下班时间点;轻工业负荷特性白天总体变化较为平缓,而夜间负荷大大降低<sup>[15]</sup>。

### 1.2 用户负荷组合模型

基于用户负荷特性,构建用户负荷组合模型,为了刻画用户在组合模型中的选中状态而引入决策向量为

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2)$$

式中:  $x_i$  表征第  $i$  个用户是否被选中参与负荷组合优化,即

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{被选中} \\ 0, & \text{未被选中} \end{cases} \quad (3)$$

则用户负荷组合模型为

$$\mathbf{l}_{\mathbf{x} \in S} = \mathbf{x} \cdot \mathbf{P} = \left[ \sum_{i=1}^n x_i P_{i1}, \sum_{i=1}^n x_i P_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n x_i P_{iT} \right] \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{l}$  为用户组合后的综合负荷特性;  $S$  为  $\mathbf{x}$  所有可能形式的状态集,共有  $2^n$  个状态;  $\sum_{i=1}^n x_i P_{it}$  为组合用户的综合负荷特性。

基于上述用户负荷组合模型,可得售电公司与组合用户开展电力交易的总电量为

$$Q = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (x_i P_{it}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$  为用户负荷大小采集周期, h。

组合用户的综合负荷率为



$$LF = \frac{\bar{P}}{P_{n\max}} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (x_i P_{it})}{T \cdot P_{n\max}} \quad (6)$$

式中： $\bar{P}$ 为平均负荷； $P_{n\max}$ 为最大负荷，即

$$P_{n\max} = \max \left\{ \sum_{i=1}^n x_i P_{i1}, \sum_{i=1}^n x_i P_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n x_i P_{iT} \right\} \quad (7)$$

考虑售电公司与发电商的电力交易属中长期协议交易，负荷率的变动将引起售电公司购电成本的变化，即

$$C_{\text{purchase}} = Q \cdot p_{\text{cost}} = \left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n x_i P_{it} \Delta t \right) \cdot p_{\text{cost}} \quad (8)$$

其中

$$p_{\text{cost}} = f(LF) \quad (9)$$

式中： $C_{\text{purchase}}$ 为售电公司向发电商购电需要的购电成本，元； $p_{\text{cost}}$ 为售电公司向发电商购电时的购电单价，其与负荷率 $LF$ 之间存在函数关系<sup>[16]</sup>，在 $LF \in [0, 1]$ 时，售电公司的购电单价(元/(kW·h))将呈递减规律。

则售电公司的购售电利益为

$$\text{profit} = Q \cdot p_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \quad (10)$$

其中

$$Q = [ Q_{\text{peak}} \quad Q_{\text{flat}} \quad Q_{\text{valley}} ] \quad (11)$$

$$p_{\text{sell}} = [ p_{\text{sell\_peak}} \quad p_{\text{sell\_flat}} \quad p_{\text{sell\_valley}} ] \quad (12)$$

式中： $\text{profit}$ 为售电公司的购售电利益，元； $Q$ 为组合用户分时用电量向量， $Q_{\text{peak}}$ 为组合用户在用电高峰时段内的用电量， $Q_{\text{flat}}$ 为组合用户在用电平时段内的用电量， $Q_{\text{valley}}$ 为组合用户在用电低谷时段内的用电量，其计算方法类同于式(5)，元/(kW·h)； $p_{\text{sell}}$ 为分时售电单价向量，该向量随进行负荷组合优化的用户群组类别而异， $p_{\text{sell\_peak}}$ 为该用户群组用电高峰时段售电单价， $p_{\text{sell\_flat}}$ 为用电平时段售电单价， $p_{\text{sell\_valley}}$ 为用电低谷时段售电单价，元/(kW·h)。

## 2 多场景下负荷组合优化模型

不同用户的负荷特性各不相同，进行负荷组合优化的本质是具有负荷聚合商性质的售电公司，通过用户负荷特性的分析与建模，开展用户负荷的组合优化研究，从用户群组中合理选择用

户，以达到售电公司的运营目标。电力市场环境下，售电公司面临愈发激烈的售电竞争，不同售电公司由于发展阶段的战略要求不同，在进行用户负荷组合优化中应构建不同场景下的负荷组合优化模型，以合理整合用户资源。

发展初期的售电公司由于前期投资较大，在负荷组合优化决策中更注重收益，因而构建考虑售电公司购售电利益最大化的负荷组合优化模型较为适合发展初期的售电公司。

发展过渡期的售电公司需要不断积累用户资源，开展更多的电力交易，吸引更多用户参与该售电公司的负荷组合优化，因而构建考虑交易量最大化的负荷组合优化模型对发展过渡期的售电公司较为合适。

发展成熟期的售电公司已有一定的资本积累与用户资源，其对公司长远发展及战略定位有更高的要求，因而该时期的售电公司在负荷组合优化决策中对本公司的可持续发展及其与电网的协调发展更为注重，因而发展成熟期的售电公司需要构建考虑负荷率最大化的负荷组合优化模型。

### 2.1 购售电利益最大化的负荷组合优化模型

对发展初期的售电公司来说，在利益最大化场景下，以售电公司购售电利益最大化为优化目标，构建考虑售电公司购售电利益最大化的负荷组合优化模型为

$$\begin{cases} \max \text{profit} = Q \cdot p_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ LF \geq LF_{\text{set}} \\ Q \geq Q_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中：约束函数 $\sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max}$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ )表示以最大化售电公司购售电利益组合用户负荷时，时间 $T$ 内任意时刻的组合负荷不能超过售电公司所能承受的最大负荷限制 $P_{N\max}$ ；约束函数 $LF \geq LF_{\text{set}}$ ，表示最大化售电公司购售电利益下用户组合的综合负荷率必须高于一定阈值 $LF_{\text{set}}$ ；约束函数 $Q \geq Q_0$ ，表示以最大化售电公司购售电利益组合用户负荷后，进行组合的用户总体电量不能少于最低的交易电量 $Q_0$ 。

售电公司购电单价与 $LF$ 之间所存在的函数关系可根据配电成本和负荷率关系模型<sup>[17]</sup>，通过国外现行负荷率电价数据拟合得



$$p_{\text{cost}} = \frac{a_n \cdot \text{LF}^n + a_{n-1} \cdot \text{LF}^{n-1} + \dots + a_1 \text{LF} + a_0}{b_m \cdot \text{LF}^m + b_{m-1} \cdot \text{LF}^{m-1} + \dots + b_1 \text{LF} + b_0} \quad (14)$$

本模型的现实意义为：发展初期的售电公司对用户负荷进行组合优化，希望在满足综合负荷率和交易电量要求的基础上，得到最大利益。

### 2.2 交易电量最大化的负荷组合优化模型

发展过渡期的售电公司为尽可能开展电力交易，以积累用户资源，将以最大化交易电量为优化目标构建负荷组合优化模型为

$$\begin{cases} \max Q = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (x_i P_{it}) \cdot \Delta t \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ \text{LF} \geq \text{LF}_{\text{set}} \\ \mathbf{Q} \cdot \mathbf{p}_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \geq \text{profit}_{\text{set}} \end{cases} \quad (15)$$

式中：约束函数  $\sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max}$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) 表示以最大化交易电量组合用户负荷时，时间  $T$  内任意时刻的组合负荷不能超过售电公司所能承受的最大负荷限制  $P_{N\max}$ ；约束函数  $\text{LF} \geq \text{LF}_{\text{set}}$ ，表示最大化交易电量下组合用户的综合负荷率必须高于一定阈值  $\text{LF}_{\text{set}}$ ；约束函数  $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{p}_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \geq \text{profit}_{\text{set}}$ ，表示以最大化交易电量组合用户负荷后，售电公司的购售电利益不低于设定值  $\text{profit}_{\text{set}}$ 。

本模型的现实意义为：发展过渡期的售电公司对用户负荷进行组合优化，希望在满足综合负荷率要求及达到购售电利益阈值的基础上，得到的交易电量最大。

### 2.3 综合负荷率最大化的负荷组合优化模型

发展成熟期的售电公司在资本与用户资源积累的基础上，为促进公司的可持续发展及其与电网的协调发展，将以最大化综合负荷率为优化目标开展用户负荷组合优化，该场景下的组合优化模型为

$$\begin{cases} \max \text{LF} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (x_i P_{it})}{T \cdot P_{n\max}} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max} \quad t = 1, 2, \dots, T \\ Q \geq Q_0 \\ \mathbf{Q} \cdot \mathbf{p}_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \geq \text{profit}_{\text{set}} \end{cases} \quad (16)$$

式中：约束函数  $\sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{it} \leq P_{N\max}$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) 表示以负荷率最高为优化目标组合用户负荷时，时间  $T$  内任意时刻的组合负荷不能超过售电公司所能承受的最大负荷限制  $P_{N\max}$ ；约束函数  $Q \geq Q_0$ ，表示在负荷率最高场景下组合用户负荷后，进行组合的用户总体电量不能少于最低的交易电量  $Q_0$ ，同时也防止仅少量用户组合后达到最高负荷率，从而造成用户基数或交易电量过少；约束函数  $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{p}_{\text{sell}}^T - C_{\text{purchase}} \geq \text{profit}_{\text{set}}$ ，表示以负荷率最高来组合用户负荷后，售电公司的购售电利益不低于设定值  $\text{profit}_{\text{set}}$ 。

本模型的现实意义为：发展成熟期的售电公司对用户负荷进行组合优化，在满足交易电量要求及购售电利益阈值的基础上，希望用户组合优化后的综合负荷率能达到最高，以减小电力交易对电网的波动。

## 3 改进的贪婪搜索算法

本文针对不同发展阶段的售电公司提出了不同场景下的负荷组合优化模型，为不同类型的售电公司或同一售电公司在不同的发展阶段开展用户负荷组合优化提供运营策略。在对上述不同场景下的组合优化模型进行求解的过程中，需要从用户群组中确定不同场景下的最佳用户组合形式，最佳组合形式的用户数量无法确定，因此需要对所有可能的组合形式进行考虑。采用精确算法能够在理论上确保得到精确最优解<sup>[18]</sup>，然而当用户数超过一定数量时，由于组合状态的复杂性，将产生组合爆炸问题<sup>[19]</sup>，采用精确算法求解实际问题耗时巨大甚至不可行。而贪婪搜索算法通过自顶向下的策略，在每一次迭代时都进行一次贪心选择，从而将问题的规模逐步减小，虽然不是从整体的全局状态上而是从当前的局部状态上做出的最优选择，但是其所求得的局部最优解也是全局最优解的一个有效近似<sup>[20]</sup>。因此本文引入贪婪搜索算法以逐步逼近最优值来求解不同场景下的负荷组合优化模型。

贪婪搜索算法较为简便，并拥有高效率，在求解组合优化的问题上又可以得到一个令人较为满意的、近似度好的近似解，所以贪婪搜索算法



在组合优化问题中具有较好的适用性<sup>[21]</sup>。

本文在算法的初始估计和优化效果判定上引入随机因子改进贪婪搜索算法，以避免容易陷入局部最优，从而得到更为满意的、近似度更高的算法最优解，使该算法最优解相对于未改进前能更为逼近全局最优解。在贪婪搜索算法的初始估计上，初始用户的选择会对最佳用户组合形式结果造成影响，因此在一轮组合优化求解结束后，将重新选择初始用户进行新一轮的组合优化求解；最终从所有的组合优化结果中选取最优结果，从而提高求解质量与求解精度。在优化效果判定上，算法在局部最优处将停止优化，因此通过引入随机因素，改变目前最佳用户组合形式的综合负荷特性，借助贪婪搜索算法得到新的最佳用户组合形式，对比优化效果，从而不断逼近全局最优，改善贪婪搜索算法容易陷入局部最优的问题，使求解的质量与精度进一步得到提高。

本文所提出的 3 类场景下的负荷组合优化模型，采用上述改进的贪婪搜索算法进行求解。以第 3 个场景——考虑负荷率的负荷组合优化模型为例，基于改进贪婪搜索算法求解的具体实现步骤为：（1）初始化。随机选择第一个初始组合用户；（2）搜寻用户库中与已有的组合用户进行组合，能够使负荷率提升最多的用户，进行组合，得到用户组合形式；（3）验证该组合形式是否满足约束条件，即最大负荷限制约束、交易电量约束与售电公司购售电利益约束。若不满足约束条件，则取消步骤（2）中新增的组合用户，选择次优用户再次验证约束条件，依此类推直至确定满足约束条件的新增组合用户，得到合适的用户组合形式；（4）重复步骤（2）和步骤（3），不断壮大组合用户数量。当达到局部最优时，即此时的用户组合形式与剩下的所有用户进行分别组合，其综合负荷率都不会再增大时，确定此时的用户组合形式为最佳用户组合；（5）引入随机因素，随机接受一名用户，改变目前最佳用户组合形式的综合负荷特性，跳至步骤（2），找到下一个最优点，得到新的最佳用户组合形式；（6）对比新的最佳用户组合形式和目前最佳用户组合形式的综合负荷率，若综合负荷率有所提升，则将新的最佳用户组合形式确定为目前最佳组合，跳至步骤（5），若综合负荷率没有提

高，则目前最佳用户组合形式为本轮贪婪搜索算法的最优解；（7）本轮贪婪搜索算法结束后，跳至步骤（1），引入随机因素，重新选择初始组合用户，再进行新一轮贪婪搜索算法求解最佳用户组合形式，重复步骤（7），最终从所有的最佳用户组合形式中选取最优结果。

基于改进贪婪搜索算法在考虑负荷率的用户负荷组合优化中的流程如图 1 所示。

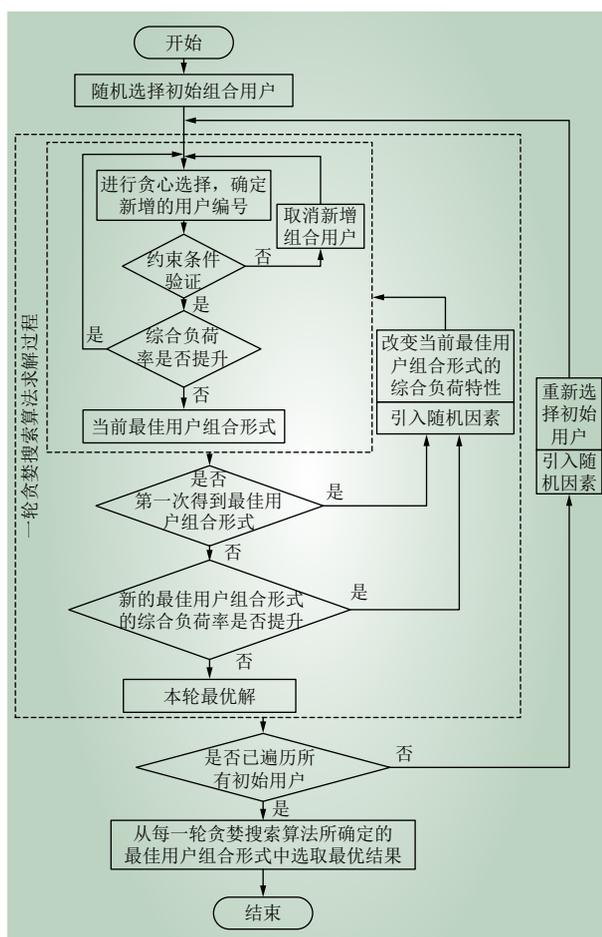


图 1 改进贪婪搜索算法在考虑负荷率的组合优化中的流程  
Fig. 1 Process of improving greedy search algorithm for combinatorial optimization with consideration of load rate

## 4 算例分析

本文采用某市 2017 年工业用户群组负荷数据，利用上述改进贪婪搜索算法来求解不同场景下负荷组合优化模型。

假定在市场环境下，需要对某区域内 100 名用户开展负荷组合优化，全体用户的综合负荷特性如图 2 所示。

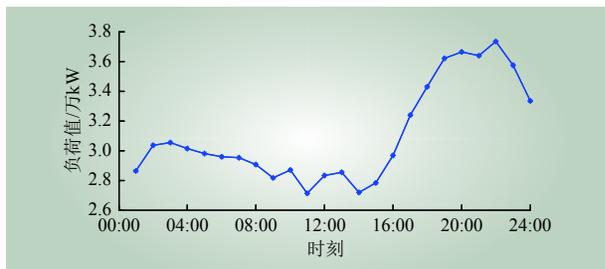


图 2 组合优化前用户的综合负荷特性曲线  
Fig. 2 Comprehensive load characteristic curve of users before combinatorial optimization

由图 2 可以看出，组合优化前全体用户群组的综合负荷特性曲线的波动性较强，存在较大的峰谷差，需要在不同的场景下根据不同的优化目标对该用户群组开展负荷组合优化，以改善用户组合的综合负荷特性。

以下针对不同发展阶段的售电公司，分别在售电公司购售电利益最大化、交易电量最大化和综合负荷率最高的场景下，利用改进贪婪搜索算法求解不同用户负荷组合优化模型。

#### 4.1 考虑购售电利益的场景

该场景下，组合用户数量的增多将使交易电量  $Q$  增大，同时也可能导致 LF 的下降，由于售电公司购电单价与综合负荷率之间的负相关性，售电公司购电成本将会提升。因此，此场景下的售电公司需要考虑如何合理开展用户负荷组合优化，以达到使其利益最大的均衡点。

假定该工业用户群组高峰时段售电单价为 1.069 7 元/(kW·h)，平时段售电单价为 0.641 8 元/(kW·h)，低谷时段售电单价为 0.313 9 元/(kW·h)，售电公司所能承受的最大负荷限制为 34 MW，用户组合的综合负荷率不低于 85%，交易电量不低于  $3.5 \times 10^5$  kW·h，售电公司购电单价与负荷率之间的函数关系<sup>[13,21]</sup>为

$$p_{\text{cost}} = (-0.9217LF^4 + 2.562LF^3 - 3.144LF^2 + 1.787LF - 0.02435)(LF - 0.04419)$$

该场景下的目标函数为售电公司购售电利益最大化，组合优化结果如表 1 所示。

本场景下，用户组合优化前后的综合负荷特性曲线如图 3 所示。

根据以上仿真结果可知，相对全体用户组合形式下，本场景下用户负荷组合优化后售电公司的购售电利益更高，为 16.018 万元，同时用户组

合的综合负荷率也得到了提升，综合负荷特性曲线的波动性与峰谷差大大减小。

表 1 购售电利益最大场景下组合优化结果对比  
Table 1 Comparison of combinatorial optimization results under the scenario of maximum benefit of electricity purchase and sale

组合形式	综合负荷率/ %	交易电量/ (MW·h)	购售电利益/ 万元	用户 数
全体用户组合形式	78.21	74.546	15.021	100
考虑购售电利益的 最佳用户组合形式	92.69	49.961	16.018	70

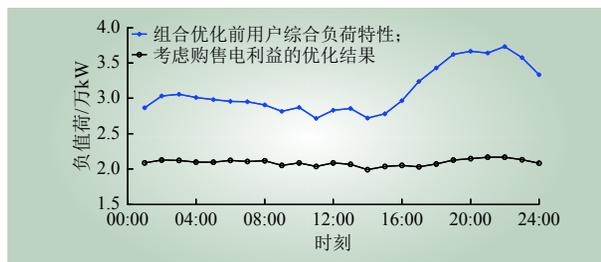


图 3 购售电利益最大场景下综合负荷特性曲线  
Fig. 3 Comprehensive load characteristic curve under the scenario of maximum benefit of electricity purchase and sale

#### 4.2 考虑交易电量的场景

在此场景下，发展过渡期的售电公司开展负荷组合优化，在售电公司所能承受的最大负荷限制为 3.4 万 kW 内，满足综合负荷率不低于 85%，购售电利益不低于 14 万元的前提下，期望与用户开展电力交易的电量能达到最大，在该目标函数下进行负荷组合优化的结果如表 2 所示。

表 2 交易电量最大场景下组合优化结果对比  
Table 2 Comparison of combinatorial optimization results under the scenario of maximum electricity transaction

最佳用户组合 场景分类	综合负荷率/ %	交易电量/ (MW·h)	购售电利益/ 万元	用户 数
考虑购售电利益	92.69	499.61	16.018	70
考虑交易电量	88.79	538.02	15.570	78

全体用户组合形式及场景 1、场景 2 下最佳用户组合形式的综合负荷特性曲线如图 4 所示。

根据以上仿真结果可知，在满足综合负荷率与售电公司购售电利益不低于阈值的条件下，本场景下用户负荷进行组合优化后的交易电量为



53.802 万 kW·h，对比考虑购售电利益的场景，虽然综合负荷率与售电公司购售电利益有所降低，但是交易电量与组合用户数却大大增加。

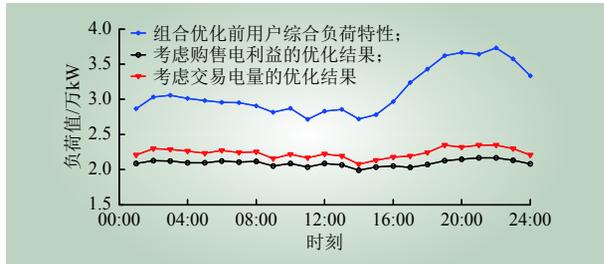


图 4 交易电量最大场景下综合负荷特性曲线

Fig. 4 Comprehensive load characteristic curve under the scenario of maximum electricity transaction

### 4.3 考虑综合负荷率的场景

在此场景下，发展成熟期的售电公司在其所能承受的最大负荷限制为 3.4 万 kW 内，满足交易电量不低于 30 万 kW·h，购售电利益不低于 12 万元的前提下，期望用户负荷组合优化后的综合负荷率能达到最高，在该目标函数下进行负荷组合优化的结果如表 3 所示。

表 3 综合负荷率最高场景下组合优化结果对比  
Table 3 Comparison of combinatorial optimization results under the scenario of maximum comprehensive load rate

最佳用户组合 场景分类	综合负荷率/ %	交易电量/ (MW·h)	购售电利益/ 万元	用户 数
考虑购售电利益	92.69	499.61	16.018	70
考虑交易电量	88.79	538.02	15.570	78
考虑综合负荷率	94.81	391.32	13.207	54

全体用户组合形式及场景 1、场景 2、场景 3 下最佳用户组合形式的综合负荷特性曲线如图 5 所示。

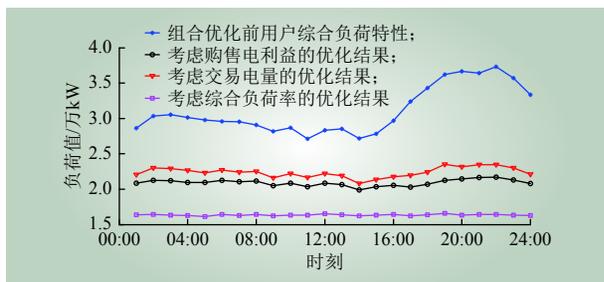


图 5 负荷率最高场景下综合负荷特性曲线

Fig. 5 Comprehensive load characteristic curve under the scenario of maximum load rate

根据以上仿真结果可知，在保证基本交易电量与购售电利益的条件下，本场景下用户负荷进行组合优化后的综合负荷率达到 94.81%，高于前两个场景的综合负荷率。同时，本场景下综合负荷特性曲线最为平缓，波动性与峰谷差最小。

### 4.4 贪婪搜索算法改进前后效果对比

上述 3 个场景下模型的求解均采用改进的贪婪搜索算法，以下对贪婪搜索算法改进前后的效果进行对比分析，结果如表 4 所示。

表 4 贪婪搜索算法改进前后效果对比

Table 4 Comparison of greedy search algorithm before and after improvement

对比项	考虑购售电利益最大(场景1)时的 购售电利益/万元	考虑交易电量最大(场景2)时的交 易电量/(MW·h)	考虑综合负荷率最高(场景3)时的 综合负荷率/%
改进前	15.613	505.65	92.91
改进后	16.018	538.02	94.81

根据上述求解对比结果可知，改进的贪婪搜索算法在模型的求解上精度更高、效果更好。以考虑综合负荷率最高的场景为例，采用未改进的贪婪搜索算法求解的最高负荷率仅为 92.91%，而改进的贪婪搜索算法通过在初始估计和优化效果判定上对算法加以改进后，对解有更强的搜索能力，求解所得最高负荷率为 94.81%。因此采用改进的贪婪搜索算法求解该组合优化模型时能得到更接近全局最优解的算法近似解，提高了求解的质量与精度。

## 5 结语

电力负荷特性复杂多样，用户负荷具有多样性、互补性、相似性和周期性，在市场竞争环境下，不同发展阶段的售电公司需要对用户侧资源充分挖掘，从而降低购电成本，提高电网运行效率。本文基于用户负荷特性，针对不同发展阶段售电公司的用户负荷组合优化问题进行了深入研究，提出了不同场景下的负荷组合优化模型。同时本文对贪婪搜索算法进行改进，并将其应用于不同场景下的组合优化模型的求解中，使求解的质量与精度得到提高，为不同类型的售电公司或同一售电公司在不同的发展阶段开展用户负荷组合优化提供合理的运营策略。



通过用户负荷组合优化可以实现不同用户负荷的功率整合,改善综合负荷特性,达到移峰填谷、降低配电网损耗的目的,从而提高售电公司运营效益。

### 参考文献:

- [1] 陈玮,梁博森,蒙文川,等.计及负荷和电价不确定性的电力零售公司购电组合优化[J].*电力建设*,2016,37(7):54-61.  
CHEN Wei, LIANG Bomiao, MENG Wenchuan, *et al.* Optimal portfolio strategies of purchasing electricity for electricity retail companies considering load and electricity price uncertainties[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(7): 54-61.
- [2] 马明,孙璞玉,张焰,等.电力负荷优化组合及其在城网改造中的应用[J].*电网与清洁能源*,2014,30(8):37-42.  
MA Ming, SUN Puyu, ZHANG Yan, *et al.* Optimal combination of power loads and its application in urban power network renovation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2014, 30(8): 37-42.
- [3] 祝锦舟,张焰,华月申,等.基于马尔科夫链的电力负荷优化组合及应用[J].*电网技术*,2016,40(8):2437-2443.  
ZHU Jinzhou, ZHANG Yan, HUA Yueshen, *et al.* Power loads optimal combination based on Markov chain and its application[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(8): 2437-2443.
- [4] LIAN Hongbo, DI Xuejin, SHEN Zhengyi, *et al.* Detailed power distribution network planning based on the description of load characteristics[C]//2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2014.
- [5] 欧帝宏,陈皓勇,何瑞辉.一种基于解空间划分的配电网最优重构算法[J].*电网技术*,2012,36(3):140-145.  
OU Dihong, CHEN Haoyong, HE Ruihui. An optimal distribution network reconfiguration algorithm based on division of solution space[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(3): 140-145.
- [6] 王淳.基于化学反应算法的配电网重构[J].*电网技术*,2012,36(5):209-214.  
WANG Chun. Distribution network reconfiguration based on chemical reaction optimization[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(5): 209-214.
- [7] 伍言,刘俊勇,刘友波,等.基于负荷组合与光伏电源匹配算法的微电网配置[J].*华东电力*,2012,40(1):51-55.  
WU Yan, LIU Junyong, LIU Youbo, *et al.* Microgrid configuration based on matching algorithm between load combination and photovoltaic DG[J]. *East China Electric Power*, 2012, 40(1): 51-55.
- [8] 黄宇腾,侯芳,周勤,等.一种面向需求侧管理的用户负荷形态组合分析方法[J].*电力系统保护与控制*,2013,41(13):20-25.  
HUANG Yuteng, HOU Fang, ZHOU Qin, *et al.* A new combinational electrical load analysis method for demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(13): 20-25.
- [9] 孙伟,李林川,卢庆聪,等.基于停电区域的电力系统故障诊断的一种新模型[J].*电网技术*,2004,28(5):30-34.  
SUN Wei, LI Linchuan, LU Qingcong, *et al.* A new method for power system fault diagnosis based on power supply interrupted region[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(5): 30-34.
- [10] 于文鹏,刘东,翁嘉明.含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J].*电力系统自动化*,2013,37(24):23-30.  
YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(24): 23-30.
- [11] 李建军,许波桅,甘世红,等.基于贪婪度表的DPSO求解舰船电力系统网络重构[J].*电工技术学报*,2011,26(5):146-151.  
LI Junjun, XU BOWEI, GAN Shihong, *et al.* Discrete particle swarm optimization algorithm based on greed table for network reconfiguration of the shipboard power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(5): 146-151.
- [12] 张声传.基于稀疏贪婪搜索的人脸图像合成[D].西安:西安电子科技大学,2016.  
ZHANG Shengchuan. Face sketch synthesis based on sparse representation and greedy search[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [13] 骆柏锋,穆云飞,贾宏杰,等.基于负荷特征库的大用户供电接入决策方法[J].*电力系统自动化*,2018,42(6):66-72.  
LUO Bofeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Decision method of power supply access for large consumers based on load feature library[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 66-72.
- [14] 李瑶,潘江蒙,姚李孝,等.考虑通道规划的城市中压配电网网络规划[J].*电网与清洁能源*,2010,26(3):58-62.  
LI Yao, PAN Jiangmeng, YAO Lixiao, *et al.* Planning of urban mid-voltage distribution network with consideration of cable trench[J]. *Power System and Clean Energy*, 2010, 26(3): 58-62.
- [15] 李欣然,姜学皎,钱军,等.基于用户日负荷曲线的用电行业分类与综合方法[J].*电力系统自动化*,2010,34(10):56-61.  
LI Xinran, JIANG Xuejiao, QIAN Jun, *et al.* A classifying and synthesizing method of power consumer industry based on the daily



- load profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 56–61.
- [16] 谭真勇. 负荷率电价的理论依据、计算方法与政策选择 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- TAN Zhenyong. The theory basis, calculation method and policy options for load factor tariff[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [17] FILIPPINI M, WILD J. Regional differences in electricity distribution costs and their consequences for yardstick regulation of access prices[J]. *Energy Economics*, 2001, 23(4): 477–488.
- [18] 饶卫振, 金淳, 陆林涛. 考虑边位置信息的求解 ETSP 问题改进贪婪算法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(4): 836–850.
- RAO Weizhen, JIN Chun, LU Lintao. An improved greedy algorithm with information of edges' location for solving the euclidean traveling salesman problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(4): 836–850.
- [19] 叶雄, 杨皓栋. 基于二叉决策图的状态组合爆炸问题并行求解方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, 7(17): 184–186.
- [20] 张立群. 求解拟阵约束下下模函数最小集合覆盖的贪婪算法及其性能保证 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- ZHANG Liqun. Maximizing submodular functions under matroid constraints with minimum set covering the greed algorithm and property guarantee[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [21] BROWN R E, KOOMEY J G. Electricity use in California: past trends and present usage patterns[J]. Energy Policy, 2003, 31(9): 849–864.

#### 作者简介:

王岩 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电动汽车、需求响应、智能用电技术研究, E-mail: wangyan2@csg.cn;

蒋静 (1993—), 女, 硕士研究生, 从事电力市场、需求侧管理研究, E-mail: 220172694@seu.edu.cn;

何恒靖 (1986—), 男, 博士, 工程师, 从事计量系统技术、非侵入式负荷辨识技术、大数据技术研究, E-mail: hehj@csg.cn;

高赐威 (1977—), 男, 通信作者, 教授, 从事电力市场、电力需求侧管理及需求响应、电力规划、电动汽车接入电网研究, E-mail: ciwei.gao@seu.edu.cn.

(责任编辑 张重实)

## Multi-scenario Load Combinatorial Optimization Based on Improved Greedy Algorithm

WANG Yan<sup>1</sup>, JIANG Jing<sup>2</sup>, HE Hengjing<sup>1</sup>, GAO Ciwei<sup>2</sup>, XIAO Yong<sup>1</sup>

(1. China Southern Power Grid Research Institute, Guangzhou 510080, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the gradual formation of sales side market competition pattern, the electricity companies can improve the safety level of power grid and the quality of power supply through load combinatorial optimization to improve the load rate and reduce the cost of electricity purchase on the users side, and to improve the equipment utilization rate and reduce the line loss on the power supply side. In order to integrate and optimize user resources according to the complementarity and diversity of power load, a user load combinatorial optimization model is proposed respectively for the scenarios of maximum purchase and sale benefits, maximum electricity transaction, and maximum comprehensive load rate based on the analysis of user load characteristics. And then, the greedy search algorithm is improved by introducing random factors to remedy the defects of the algorithm in determination of the initial estimation and optimization effects, thus improving the quality and accuracy of the algorithm. Finally, the improved greedy search algorithm is used to solve the load combinatorial optimization model under different scenarios. The improved algorithm has been verified to have stronger global search ability and adaptability in solving the combinatorial optimization problems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Key Technology of Load Aggregation and Operation Scheduling Based on Energy Storage Modeling of Air Conditioning Load, No.51577029, Demand Response Model and Application Research under Multi-temporal Scale Considering the Uncertainty, No.51277028) and Science and Technology Project of Southern Power Grid Corporation of China (Research on Customer Behavior Analysis and Value-Added Services Key Technologies Based on the Value Mining of Power Data, No.ZBKJXM20170079).

**Keywords:** electricity market; load combinatorial optimization; load rate; electricity purchase cost; improved greedy algorithm