

# 基于数据驱动的配电网“三级弹性”精准规划方法研究

谢天祥<sup>1</sup>, 赏 炜<sup>1</sup>, 高 捷<sup>2</sup>

<sup>1</sup>绍兴大明电力设计院有限公司, 浙江 绍兴

<sup>2</sup>国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴

收稿日期: 2022年6月8日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月28日

## 摘 要

构建新型电力系统, 使配电网规划建设进入新阶段, 半刚性配电网需要向“弹性配电网”过渡。本文基于数据驱动分析方法, 从配电网变电站层、线路层、配变层三个层级, 构建配电网“三级弹性”规划优化模型算法, 并通过典型实例得以验证, 使融合“三级弹性”的配电网网格化精准规划成为新型配电网规划建设的新思路、新方法。

## 关键词

数据驱动, 弹性电网, 三级弹性, 聚类分析, 精准规划

## Research on Accurate Planning Method of “Three-Level Elasticity” of Distribution Network Based on Data-Driven

Tianxiang Xie<sup>1</sup>, Wei Shang<sup>1</sup>, Jie Gao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shaoxing Daming Electric Power Design Institute Co. Ltd., Shaoxing Zhejiang

<sup>2</sup>State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd. Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing Zhejiang

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The construction of a new power system brings the planning and construction of the distribution network into a new stage, and the semi-rigid distribution network needs to transition to a “flexible distri-

tribution network". Based on the data-driven analysis method, this paper constructs the "three-level elasticity" planning optimization model algorithm of the distribution network and verified by typical examples, making the grid-based precise planning of distribution network integrating "three-level elasticity" a new type of distribution network new ideas and methods for planning and construction.

## Keywords

Data-Driven, Resilient Grid, Three-Level Elasticity, Cluster Analysis, Precise Planning

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前,以构建新型电力系统为目标的配电网规划建设进入了新阶段[1] [2] [3],源随荷动的半刚性电网,需要融合需求侧多元化、个性化需求,唤醒需求侧沉睡资源,向“弹性电网”转变。文献[4]阐释了“高弹性电网”的概念、主要特性和物理形态,设计了发展路线图和评估体系。文献[5] [6]研究了市场定价模式下,考虑需求弹性投资和检修协调的发电机组与输电网规划方法;文献[7] [8]针对新电改深入和新能源大规模上网,提出了考虑需求弹性的发电计划模型方法和弹性化的电力市场补偿结算机制;文献[9] [10]研究了电网应对极端扰害事件下的恢复力及智能电网框架下的建设措施;文献[11] [12]从灵活性、主动性方面,对配电网应对高渗透可再生能源进行分析和评价。

上述文献从高弹性电网发展评估、输电网规划、发电机组检修协调、需求弹性的发电计划等,不同角度分析了供应侧和需求侧资源弹性研究,也有文献从灵活性、主动性等方面进行了研究,但目前在配电网规划领域,尚未有从变电站、中压线路、配变三个层级,综合考虑弹性影响的相关研究文献,仍然存在按照《配电网规划设计导则》要求,配变需用负荷预测不准确,中压线路挂接配变容量一刀切,变电站容载比偏大等现象,造成能源利用和电网规划缺乏弹性,变配电设备冗余,社会综合能源和资金效率低等问题。

针对以上问题,本文采用数据驱动分析方法,融合各层级能够提升能源综合利用水平和效率的元素,从变电站层、线路层、配变层三个层级,构建配电网“三级弹性”规划模型算法,在满足地区供电负荷和安全性、可靠性条件下,采用多层优化方法进行规划模型求解,最后以某地区网格为例进行实例验证,辅助配电网网格化精准规划建设决策。

## 2. 变电站层弹性度提升模型

通过高压变电站对分布式电源接纳、利用储能实现“平滑负荷”和“削峰填谷”优化规划模型研究,提升对变电站层供电能力弹性度,为未来分布式光伏、储能接入变电站、合理切改变电站负荷提供直观性指导。

### 2.1. 考虑 DG 置信容量的变电站优化规划模型

在有源配电网中,在保证规划区域供电可靠性前提下,通过合理考虑 DG 置信容量[13],有效节约变电站建设容量。

考虑 DG 置信容量的变电站优化规划的模型[14]，如下式所示。

$$\begin{cases} \min C = C_{Station} + C_{Feeder} + C_{CQ} \\ \text{s.t. } \sum_{j \in J_i} P_j \leq S_i \cos \varphi + T_{PV}(i) + T_{WTG}(i) \\ i = 1, 2, \dots, N \\ J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_N = J \\ L(i, k) \leq R_i \end{cases} \quad (1)$$

式中： $C_{Station}$  为变电站建设及维护年费用；

$C_{Feeder}$  为变电站中压线路投资年费用；

$C_{CQ}$  为变电站中压线路网损年费用；

$N$  为变电站总数；

$P_j$  为第  $j$  个负荷点的负荷值； $S_i$  为第  $i$  个变电站的容量；

$\cos \varphi$  为功率因数；

$T_{PV}(i)$  为第  $i$  个变电站接入光伏电源置信容量；

$T_{WTG}(i)$  为第  $i$  个变电站风机电源置信容量；

$J_i$  为第  $i$  个变电站所供负荷的集合；

$J$  为全体负荷点的集合；

$L(i, k)$  为第  $i$  个变电站与第  $k$  个负荷的连线距离；

$R_i$  为第  $i$  个变电站供电半径的限制。

## 2.2. 考虑负荷峰谷差最小化的储能装置优化规划模型

以负荷峰谷差作为优化目标，主要是解决系统负荷峰值过大的问题，特别是分布式电源在负荷低谷时段消纳负荷所导致的系统负荷谷值过低，抑或是电动汽车负荷在充电高峰时期的负荷峰值过高等问题。该目标可以表示为：

$$\min(\max(P_1, P_2, \dots, P_T) - \min(P_1, P_2, \dots, P_T)) \quad (2)$$

其中， $P_1, P_2, \dots, P_T$  表示对应时刻的有功功率， $T$  为设定的仿真总时长。

## 3. 中压线路层弹性度提升模型

负荷发展阶段、负荷类型、线路接线模式、分布式光伏接入和储能，对 10 kV 线路装接容量值均有较大影响。

在电网提质增效高质量发展新阶段，考虑配电网规划的经济性，通过不同负荷特性合理组合，以及高负载率配置储能装置，可以有效提高线路的运行效率。

### 3.1. 考虑合理负载率的中压线路装接配变容量研究

基于配电网安全性、可靠性和经济性约束，考虑供电分区和负荷发展的影响，在理想取值的基础上，研究中压线路负载率的合理取值。假设考虑负荷发展的区域供电裕度为  $\alpha$ ，则规划阶段中压线路合理负载率[15]计算公式为：

$$B_n = B_0(1 + \alpha)^n \quad (3)$$

式中， $B_n$ ， $B_0$  分别为考虑负荷发展前后的线路最佳负载能力；

$n$  为预留裕度的年限，电力设备预留裕度年限一般为 1~5 年；

$\alpha$  为区域供电裕度，不同地区的发展水平不同，负荷增长率的范围一般集中在 5%~10%。

综合分析影响线路年利用效率的各类因素，建立以下相关指标算法模型，为线路年利用效率[16]的细化分析提供切入点。

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{y,max} &= \frac{P_{Y,max}}{S} \\ \lambda_{max} &= \frac{S - P_{manger}}{S} \\ \eta_{load} &= \frac{P_{avg}}{P_{Y,max}} = \frac{\int_1^{8760} P(t) dt}{P_{Y,max} \times 8760} \\ \eta_{year} &= \frac{\int_1^{8760} P(t) dt}{S \times 8760} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中， $\eta_{y,max}$  为线路最高负载率； $P_{Y,max}$  为年最大负荷；

$S$  为线路允许的最大负荷值； $\lambda_{max}$  为线路正常运行方式下安全负载率；

$P_{manger}$  临近线路故障时；安全转供限制负荷；

$P_{avg}$  为年平均负荷； $\eta_{year}$  线路年利用效率。

由以上公式推导，消除了安全限制负荷  $P_{manger}$  及负荷发展预留裕度[17] [18] [19]，求得采用线路年最高负载率相对指标，如下式所示。

$$\eta_{year} = \eta_{load} \times \eta_{Y,max} \quad (5)$$

图 1 为某中压线路年度每 5 分钟采样，一年 105,120 条的线路负载率数据。其中，红线标注为 70% 的重载标准线。

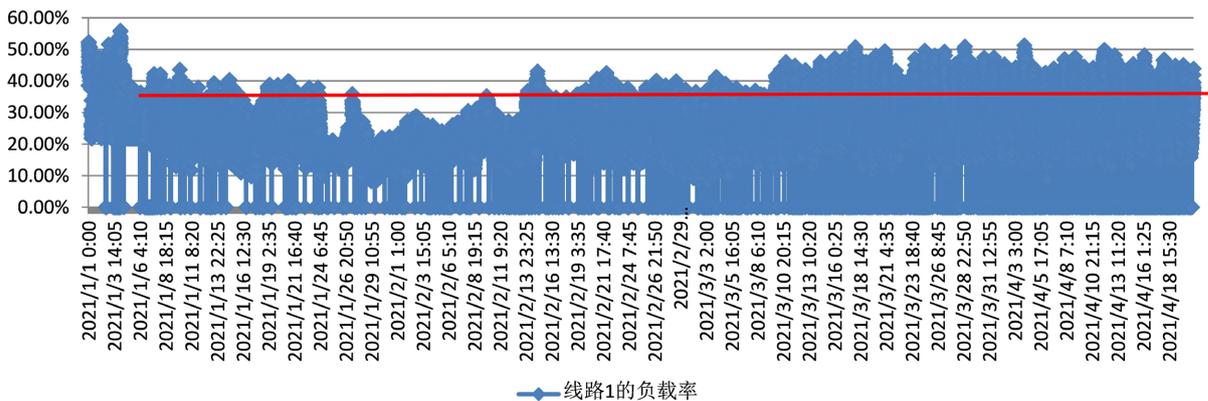


Figure 1. Annual load rate of a medium voltage line

图 1. 某 1 条中压线路年负载率

图 2 为某 4 条中压线路的年度 105,120 条的线路负载率数据。从图中可以观察到，由于数据量较多，仅仅 4 条数据，已经难以清晰判断线路的负载利用水平。

为了更好地提高线路年利用水平，可以按照年利用小时数下，各时刻最大负荷排序，得到线路年利用效率，如图 3 所示。

由图 3 可以直观地看出，样本线路的利用效率高低情况，以及各段负载率利用小时数。

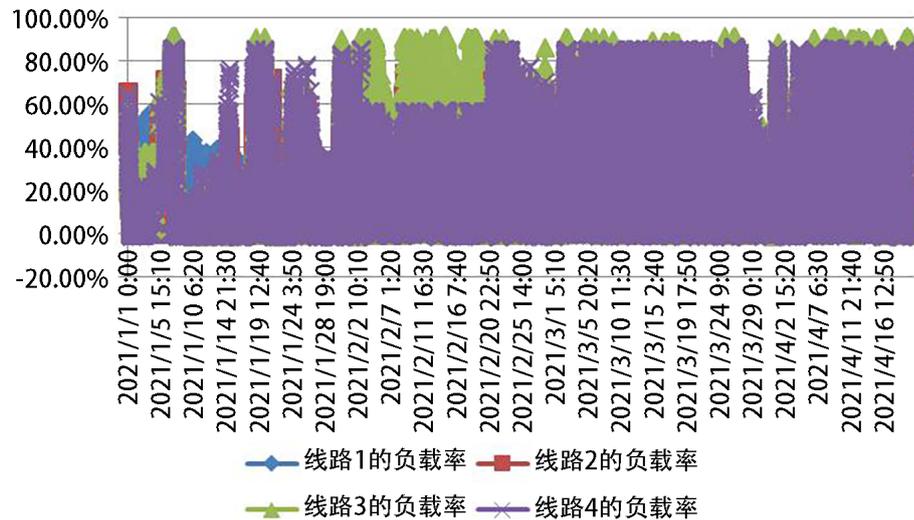


Figure 2. Annual load rate of a 4 medium-voltage lines

图 2. 某 4 条中压线路年负载率

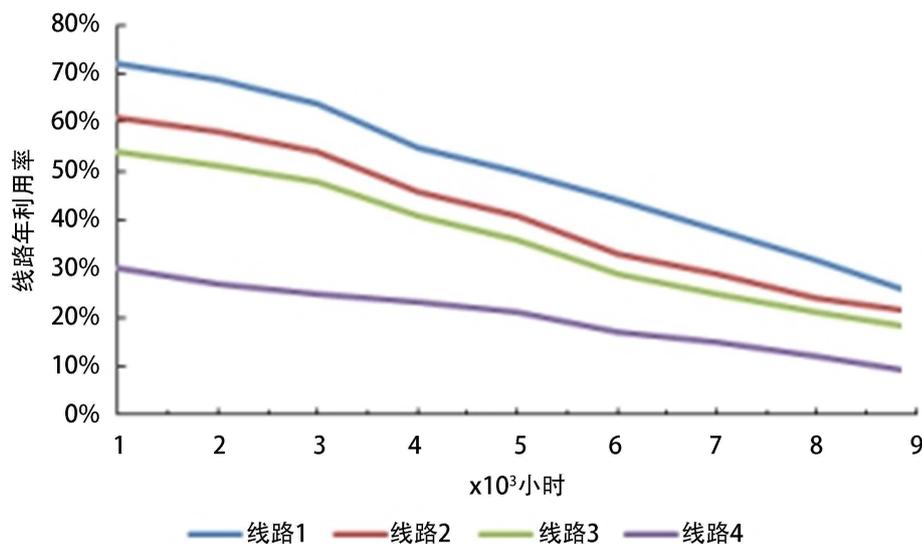


Figure 3. Schematic diagram of annual utilization efficiency of sample lines

图 3. 样本线路年利用效率示意

对负载率超过 70% 的累计时间段, 占比小于 5% 的, 以及长年处于 30% 以下的线路, 可以分别采取不同的优化措施, 精准规划改善线路利用水平。

### 3.2. 考虑中压线路负荷特性互补的优化组合研究

随着新兴负荷的不断出现, 由于行业负荷及细分的差异, 同一行业内的用户负荷特性也出现较大差异, 影响负荷预测结果的准确性和合理性。

同时, 随着分布式电源的大规模并网, 分布式电源与不同负荷的组合特性, 也会对配电网带来新型的影响因子。

深入挖掘分布式能源和多类型负荷互补特征[20] [21] [22], 合理组合不同性质负荷, 示意如图 4 所示, 引导用户有序用电, 平滑负荷特性曲线, 改善负荷的峰谷差, 提高配电网设备利用率, 是新形势下配电网规划与组网的新思路。

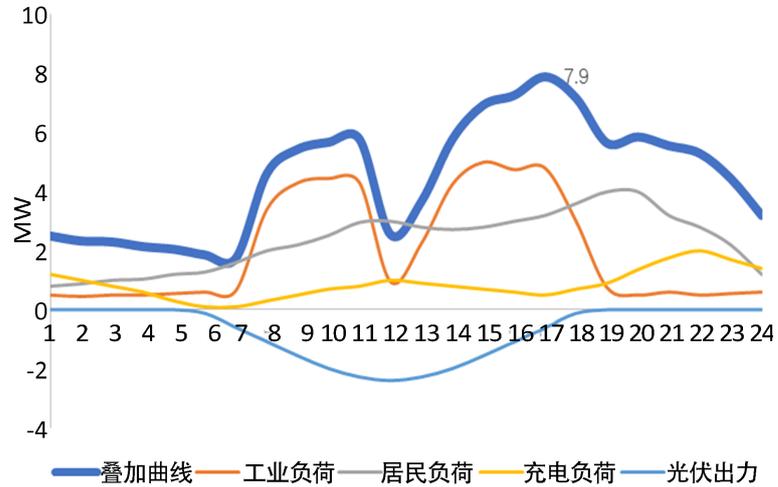


Figure 4. Schematic diagram of combined load curve  
图 4. 组合负荷曲线示意

## 4. 配变层弹性度提升模型

### 4.1. 差异化负荷聚类分析

聚类分析是针对大量无类别标签的数据样本，根据数据特性研究分类方法，将其划分为不同类别序列的过程。

主要方法有灰色聚类、模糊聚类、分层聚类、快速聚类、神经网络聚类等[23] [24] [25] [26]。本文采用最具代表性的 K-means 算法来分析。K-means 具体算法的流程图如图 5 所示。

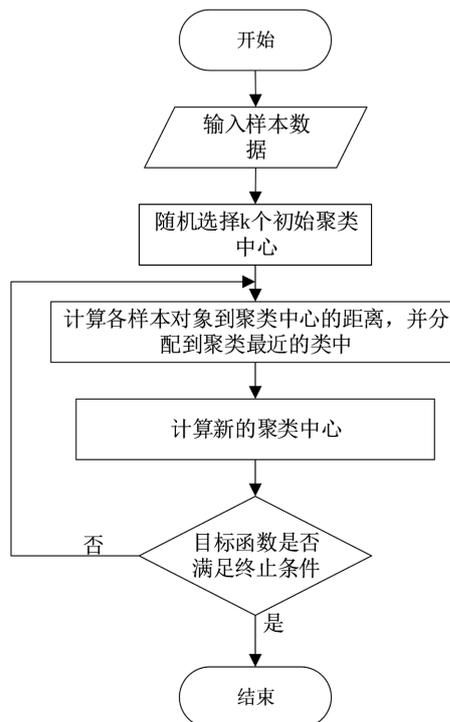


Figure 5. Flow chart of K-means algorithm  
图 5. K-means 算法流程图

以变压器一年 365 天 24 小时负荷曲线为例，采用大数据的聚类分析方法，生成如下形状迥异的 4 个聚类，如图 6、图 7 所示。

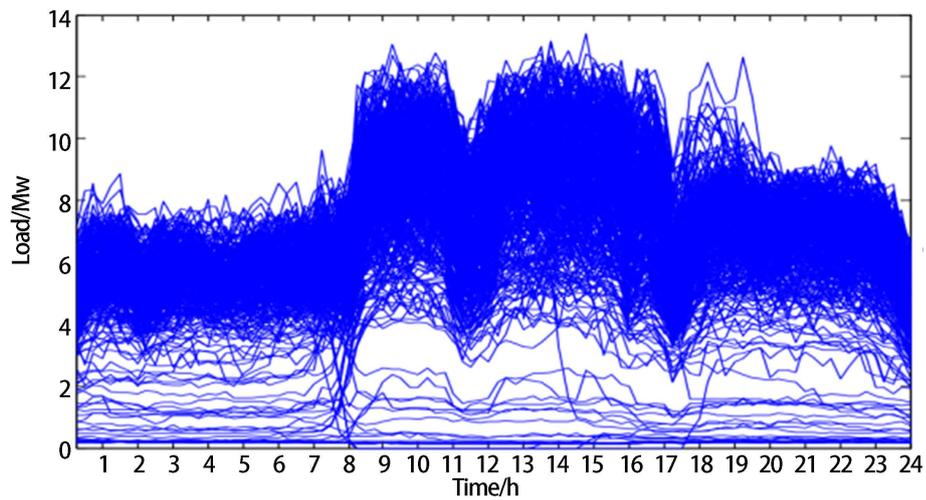


Figure 6. Transformer 365-day load curve

图 6. 变压器 365 天负荷曲线图

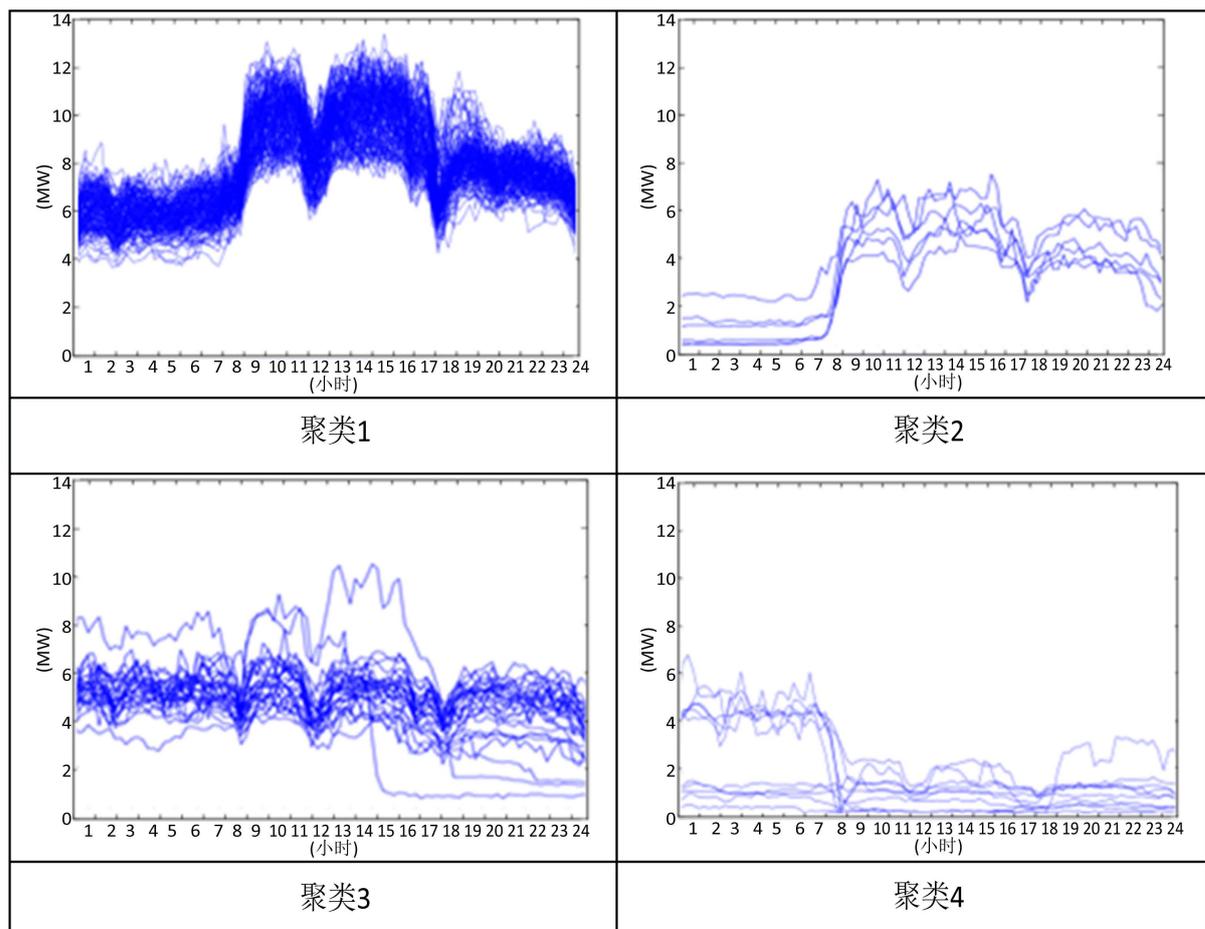


Figure 7. Schematic diagram of K-means clustering

图 7. K-means 聚类示意

## 4.2. 差异化的同时率计算

同时率指规定时间段内, 某一电力系统综合最大负荷与其所属各个子地区(或各用户、各变电站)各最大负荷之和的比值。

负荷同时率与系统中子项的个数及负荷特性有关, 通常子项数量越多、负荷特性差异越大, 则同时率越低。其计算公式为

$$K = \frac{P_{\max}}{\sum P_i} \quad (8)$$

式中:  $P_{\max}$  为综合最大负荷;

$P_i$  为第  $i$  个子项(地区、变电站、线路、用户、电源等)最大负荷。

随着电动汽车、5G 基站、储能等新兴用电形式的发展, 传统方法配电网各层级同时率取同一值难以继, 公式化的层级负荷叠加(分解)预测法准确性[13][14][15][16]无法得到保障, 影响投资有效性。

本文在数据挖掘负荷细分基础上, 根据配电网负荷层次和对应层次的同时率, 按照下式即可计算得到各层级最大负荷数值。

$$P_l = (\sum P_{li}) \cdot K_l \quad (9)$$

式中:  $P_l$  为第  $l$  层的最大负荷;

$P_{li}$  为  $P_l$  所对应范围内第  $i$  个子项的最大负荷;

$K_l$  为第  $l$  层的负荷同时率。

## 5. 算例分析

### 5.1. 实例概况

某城市供电区域共有 5 个供电网格, 区内 110 kV 变电站 4 座, 主变 8 台, 变电容量共计 360 MVA, 区域光伏现状装机容量 4 MW, 远景预测为 36 MW, 中压线路 70 条, 公用线路挂接配变共计 1881 台, 容量 504.33 MVA, 其中公用配变 861 台, 容量 273.775 MVA。供电区域网格划分、负荷构成及负荷预测, 如表 1 所示。

**Table 1.** Grid division and load forecasting of power supply area

**表 1.** 供电区域网格划分及负荷预测

序号	网格编号	网格面积(km <sup>2</sup> )	规划负荷构成	2025 年负荷(MW)
1	SX-1	27.51	工业、居住、商业金融	69.3
2	SX-2	18.95	工业、居住、商业、行政办公	85.6
3	SX-3	12.69	工业、居住	94
4	SX-4	7.87	居住、商业金融	20.5
5	SX-5	55.98	储备用地	85.6
	合计	123		355

### 5.2. 基于“三级弹性度”的配电网规划

#### 5.2.1. 考虑分布式光伏和储能的变电站弹性优化

1、利用储能实现“平滑负荷”

在不对储能系统进行功率约束的前提下, 按照负荷变化平方量最小化配置储能以达到“平滑负荷”,

优化配置储能装置效果，如图 8 中 a、表 1 所示。

2、利用储能实现“削峰填谷”

在不对储能系统进行功率约束的前提下，基于经济性研究优化策略，按照峰谷差最小的目标，优化配置储能装置效果，如图 8 中 b、表 1 所示。

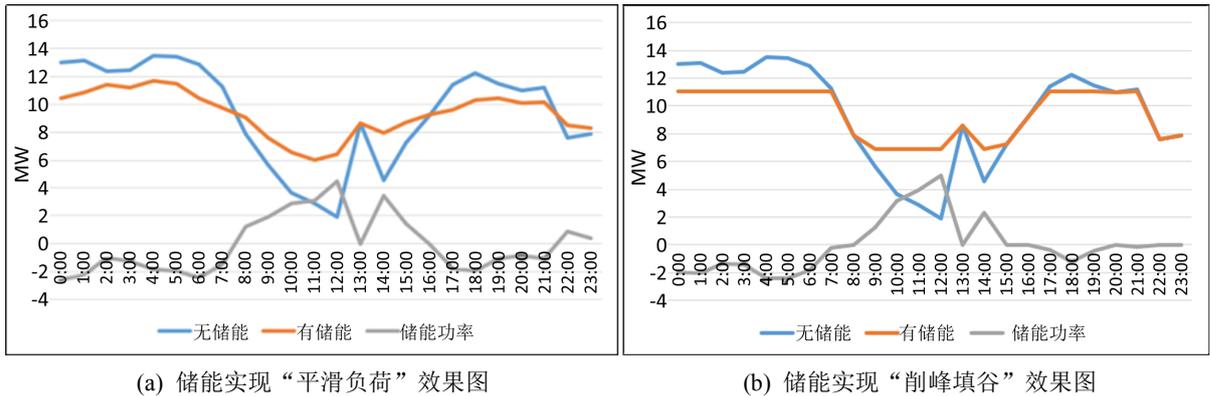


Figure 8. Comparison diagram after energy storage configuration  
图 8. 储能配置后对比图

Table 2. Comparison of various indicators after energy storage configuration  
表 2. 储能配置后各项指标对比情况表

特性指标	原配电网格	光伏接入	储能实现“平滑负荷”	储能实现“削峰填谷”
峰谷差/MW	9.36	11.57	5.66	4.19
负荷率	0.78	0.7	0.8	0.85
负荷平方变化量	91.09	180.58	16.36	36.33
负荷变化率	26.56	45.2	15.37	15.74
储能功率容量/MW	--	--	4.5	4.97
储能系统容量/MWh	--	--	18.5	15.7

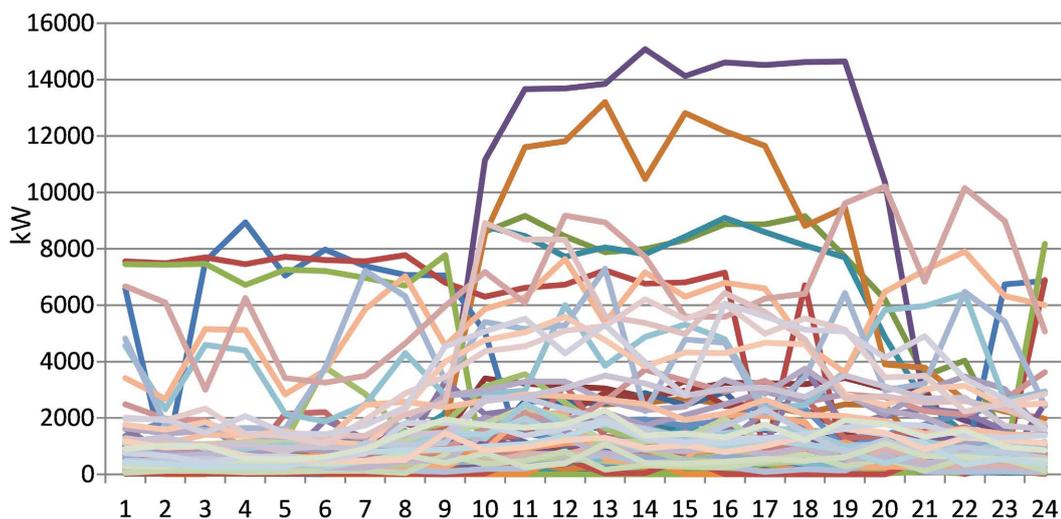


Figure 9. Typical user load statistics  
图 9. 典型用户负荷统计

从表 2 中可以看出，在上述模型运算下，利用优化算法对负荷进行“平常负荷”优化后，其负荷峰谷差将原来的 11.57 降至 5.66，负荷率由原来 0.78 提升至 0.8；利用优化算法对负荷进行“削峰填谷”优化后，其负荷峰谷差将原来的 11.57 降至 4.19，负荷率由原来 0.78 提升至 0.85。

### 5.2.2. 中压线路利用优化组合挖潜

采集营销系统专线、专变运行信息，对区域典型用户进行负荷特性分析，如图 9 所示。

对区域占比最高的工业负荷、商业负荷、居民负荷 3 类典型用户进行负荷特性分析，其负荷曲线标么值，如图 10 所示。

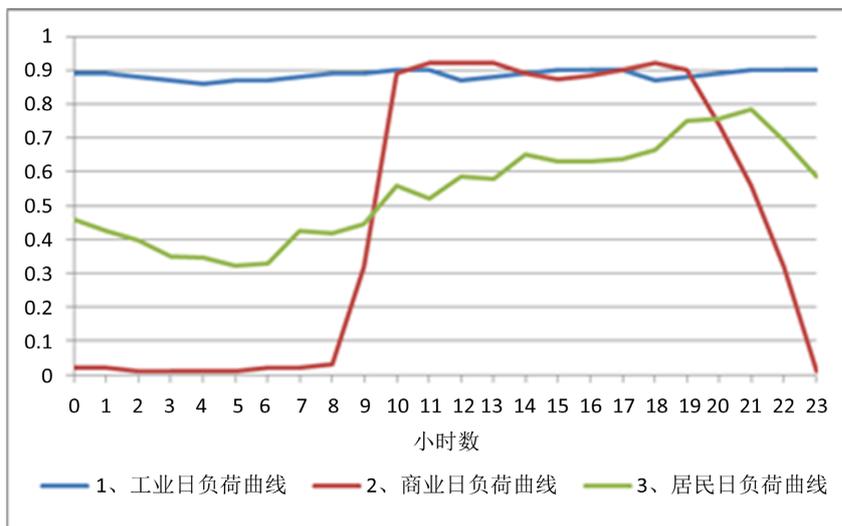


Figure 10. Typical load curve  
图 10. 典型负荷曲线

其中，工业负荷日负荷曲线较为平稳，基本保持在 0.85~0.92 之间，同时率较高；商业负荷峰谷差极大，负荷率较低；居民负荷晚高峰较高，峰谷差较大，在 0.3~0.8 之间。

选用样本线路进行分析计算，考虑不同负荷性质配变在不同数量配比下对配变同时率计算时的影响，同时率及不同接线模式下线路挂接配变容量分析结果，如图 11、图 12 所示。

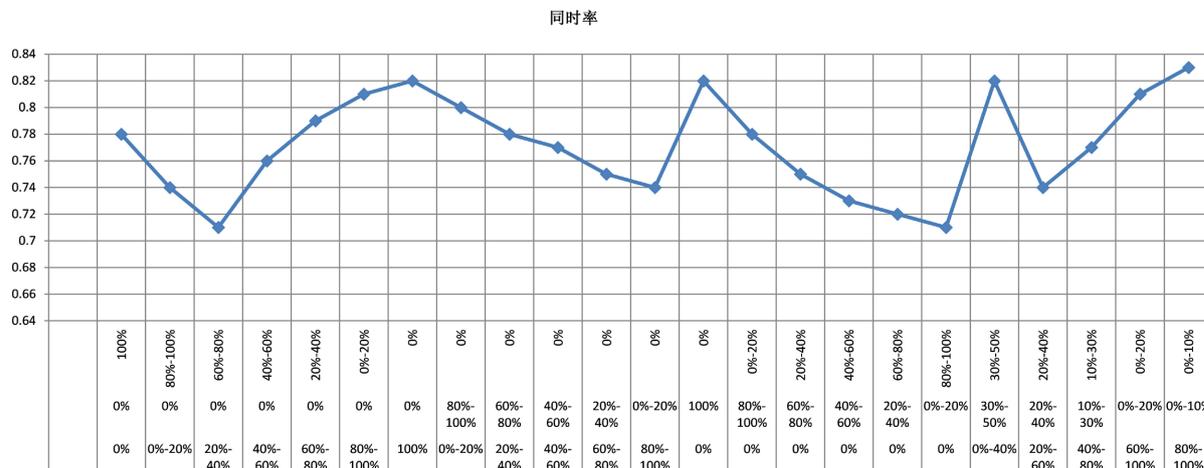


Figure 11. Simultaneous rate of distribution-transformer ratios with different load properties  
图 11. 不同负荷性质配变配比下同时率

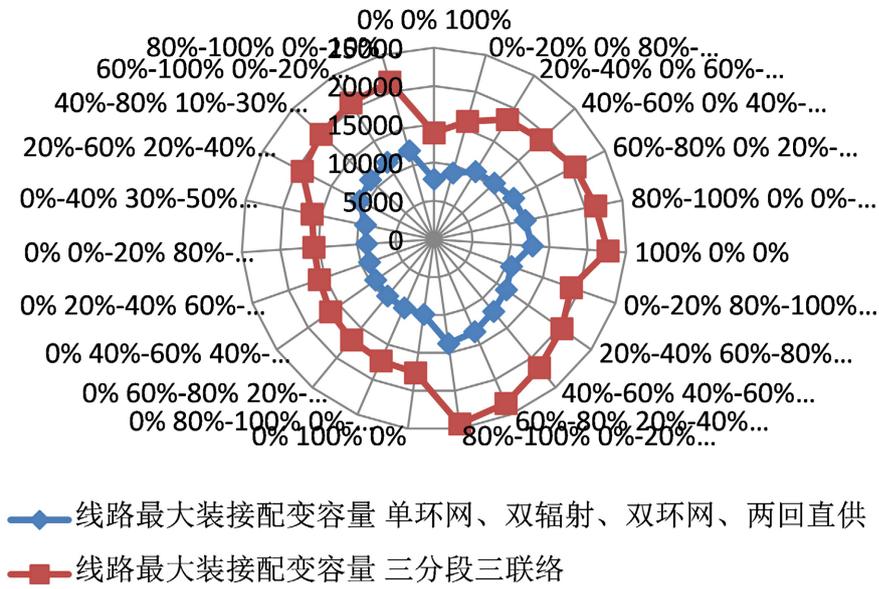


Figure 12. Line connection and distribution transformer capacity under different load proportions  
 图 12. 不同负荷性质配比下线路挂接配变容量

由图 12 可知，中压线路装接配变容量在不同负荷特性组合时，容量最大值可分别达到 MAX (9000, 12,000, 15,000, 18,000) kVA。

探索中压线路挂接配变容量与负载率之间的关系，得到相关箱图，对其中“异常”数据，可作为储能配置研究对象，如图 13 所示。

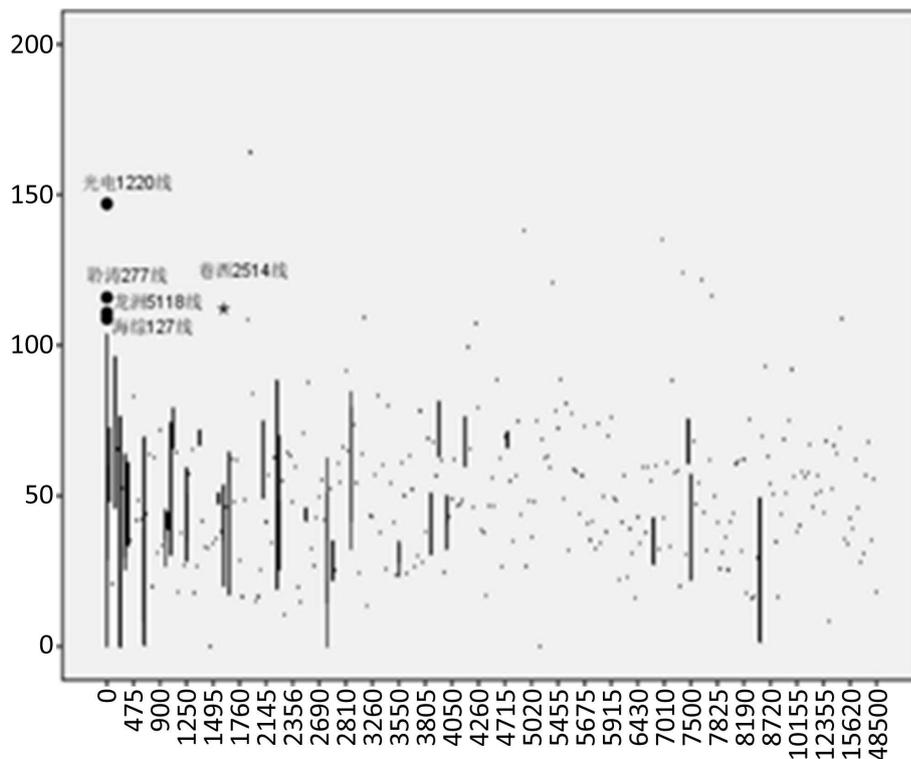


Figure 13. Box diagram of line connection and distribution transformer capacity and load rate  
 图 13. 线路挂接配变容量与负载率箱图

### 5.2.3. 配变差异化负荷聚类

采集营销系统、“网上国网”中配变负荷实测日运行数据，采用 K-means 聚类方法，识别用户负荷类型集聚区，挖掘配变资源运行使用情况，聚类效果如图 14 所示。

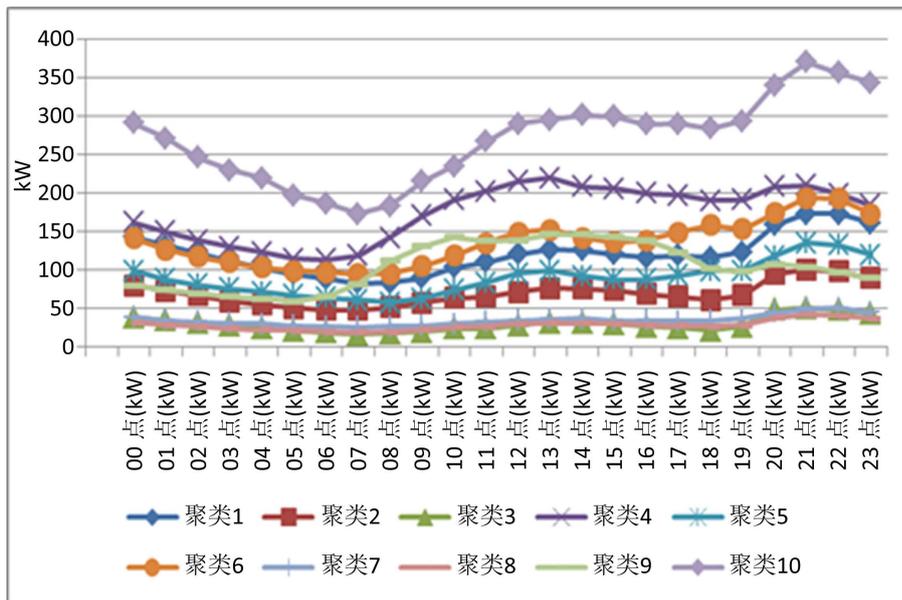


Figure 14. K-Means clustering  
图 14. K-Means 聚类

Table 3. Capacity and quantity of different clustering standard distribution variables  
表 3. 不同聚类标准配变容量及数量

聚类编号	标准配变容量	案例数
聚类 1	250	405
聚类 2	315	354
聚类 3	400	14
聚类 4	630	38
聚类 5	800	6
聚类 6	1000	33
总计		850

由图 14、表 3 分析，可以得出以下结论：

- 1、配变负荷曲线聚合，综合运行负荷最高的为 800 kVA 配变，其负荷曲线类型拟为居住类型，负载率小于 50%。
- 2、该区域单台配变最大负荷出现在晚高峰，为 21:00 左右。进一步调研，发现基本是新小区电动汽车充电设施负荷。
- 3、建议该区域配变容量配置宜小于 800 kVA，整体以 500 kVA 以下为最经济。
- 4、进一步大数据挖掘 800 kVA 及以上配变用户，可初步选为负荷池用户，进行需求侧响应引导。

### 5.3. 算例结果分析

#### 1、整体规划规模对比

经过以上规划方法，考虑“三级弹性”的规划与常规的网络化规划，规划规模对比效果，如表 3 所示。

**Table 4.** Comparison of plan sizes considering “three levels of flexibility”

**表 4.** 考虑“三级弹性”的规划规模对比

	三级配电网规模	常规的网络化规划	考虑“三级弹性”的规划	弹性度
变电站	变电站(座)	6	6	0.926
	主变台数(台)	14	13	
	变电容量(MVA)	660	610	
中压线路	公用线路数量(条)	87	74	0.851
	台数(台)	2140	2076	0.864
配变	容量(MVA)	987	831	
	其中：公变(台)	1137	935	
	容量(MVA)	455	374	
	容载比	1.86	1.72	

由表 4 可以看出，考虑“三级弹性”的规划，较常规的网络化规划，远景年有如下变化：

- ◇ 节约主变 1 台，容量 50 MVA；
- ◇ 节约公用中压线路 13 条；
- ◇ 节约配变 64 台，容量 156 MVA；
- ◇ 容载比由 1.86 降为 1.72；
- ◇ 110 kV 变电站与 10 kV 配变容量配比由 0.67 升为 0.73。

在不改变电网供电可靠性的前提下，所需配电设备规模有较大程度减少，提高了配网设备利用效率。

#### 2、变电站层弹性分析

光伏考虑置信度出力，在大规模接入下，可能造成午间负荷低谷，在无储能接入下，无论负荷曲线及峰谷差，都有待进一步优化弹性。

以负荷变化平方量最小化为优化目标的储能配置策略的“平滑负荷”效果较为显著，对于控制负荷变化平方量和负荷变化率更为有效。

以负荷峰谷差最小化为优化目标的储能配置策略的“削峰填谷”效果较为显著，对于控制负荷峰谷差和负荷率更为有效。

两种方式都可以实现最大化优化，不同的优化目标，所需要的储能配置不同。通常情况下仍需要考虑经济约束下的优化配置。

#### 3、中压线路层弹性分析

中压线路在不同接线模式、不同负荷特性配变容量组合时，容量最大值范围为 9000~18,000 kVA。

探索中压线路负载率箱图，对其中负载率长期超过 70% 的异常数据，可作为储能配置研究对象，提高线路的经济性。

#### 4、配变层需求侧响应

采用 K-means 聚类方法, 可以识别区域用户负荷类型集聚区, 初选负荷池用户, 进行需求侧响应引导对象。

通过配变负荷特性聚类分析, 可以选定与新能源特性出力较为一致的配变, 接入分布式新能源及储能装置, 有效增强配变层弹性。

## 6. 结语

本文采用数据驱动分析方法, 构建基于“三级弹性”的配电网规划模型算法, 并通过典型实例, 验证了从变电站层考虑 DG 的置信度及不同目标下的储能优化配置、中压线路层不同负荷特性组合及高负载率线路配置储能装置、配变层聚类分析特征类型及需求侧响应, 均可以提高该层级配电网弹性, 实现配电网网格化规划优化方案, 节约配电网建设投资的同时, 使刚性配电网规划建设逐步向新型高弹性配电网过渡。

## 基金项目

绍兴大明电力设计院有限公司科技项目资助(SGZJSX00SJS210024)。

## 参考文献

- [1] 刘林, 张运洲, 王雪, 等. 能源互联网目标下电力信息物理系统深度融合发展研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 8-15.
- [2] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 6-16.
- [3] 孙可, 裴传逊, 翁秉宇. 转型发展形势下城市电网发展协调性评价[J]. 电气工程, 2020, 8(3): 11.
- [4] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-496.
- [5] 吉兴全, 王成山. 考虑需求弹性的启发式输电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 1-4.
- [6] 方陈, 夏清, 孙欣. 考虑需求弹性的发电检修协调方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 38-44.
- [7] 陈雨果, 张轩, 罗钢, 等. 用户报量不报价模式下电力现货市场需求响应机制与方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 179-186.
- [8] 舒畅, 钟海旺, 夏清, 等. 约束条件弹性化的月度电力市场机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 587-595.
- [9] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015(22): 1-9.
- [10] 聂源君. 弹性电网及其恢复力的研究与展望[J]. 山东工业技术, 2017(24): 189-190.
- [11] 马杰, 李秋燕, 丁岩, 等. 含高渗透率可再生能源的配电网灵活性评价体系构建方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 99-105.
- [12] 崔荣, 王国权, 胡凌. 主动配电网典型线路接入 DG 能力分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 146-150.
- [13] 刘浩军. 考虑负荷特性的有源配电网变电站优化规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015(s1): 126-131.
- [14] 刘洪, 王博, 李梅菊, 郭力, 刘伟, 屈高强. 基于改进加权 Voronoi 图算法的有源配电网变电站规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 51-58.
- [15] 刘洪, 杨卫红, 王成山, 等. 配电网设备利用率评价标准与提升措施[J]. 电网技术, 2014(2): 419-423.
- [16] 张蓓, 陈荃, 张俊潇, 等. 中压配电网线路利用效率评价指标及其提升策略[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 127-133.
- [17] 徐青山, 刘梦佳, 戴蔚莺, 等. 计及用户响应不确定性的可中断负荷储蓄机制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3198-3208.
- [18] 刘胜利, 陈建华, 曹阳, 等. 基于 N-1 和负荷特性的配电网最大接入容量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014(12): 126-130.
- [19] 邱起瑞, 李更丰, 潘雨晴. 基于用电行为综合指标的用户负荷分类研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 26-31.
- [20] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019,

---

43(7): 67-73.

- [21] 金辰曦, 卢先领, 徐宇颂, 刘如浩, 张家想. 基于相似日和多集成组合的短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 31-38.
- [22] 沈依婷, 武鹏, 张菁, 等. 模糊不确定性负荷下的配电网网架规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 144-150.
- [23] 杨卫红, 赖清平, 兰宇, 等. 基于调节潜力指标的用户用电行为聚类分析算法研究[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 96-104.
- [24] 冯志颖, 唐文虎, 吴青华, 等. 考虑负荷纵向随机性的用户用电行为聚类方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 39-44, 53.
- [25] 蔡秋娜, 刘思捷, 陆秋瑜. 基于 GMM 聚类和 SVM 的用户负荷行业分类辨识方法[J]. 广东电力, 2017(F12): 91-96.
- [26] 周冰钰, 刘博, 王丹, 等. 基于自组织中心 K-means 算法的用户互动用电行为聚类分析[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 68-76.