

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210374

Elastic-net 变量选择及其在配网投资决策中的应用

罗婷¹, 刘小惠¹, 程宏波²

(1. 江西财经大学统计学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于配网历史建设情况筛选重要指标进行针对性的精准投资是提升配网建设效果的有效手段。使用多源融合技术对配网不同系统的建设及运行数据进行融合, 利用文本数据抽取技术对项目建设记录进行结构化转换。采用 Elastic-net 对所提取的指标数据进行筛选, 基于 BIC 准则对 Elastic-net 的参数进行优化选取, 得到项目建设指标的重要性排序。根据重要性排序结果建立配网建设投资决策模型。不同投资决策方案的对比分析表明, 所提投资决策模型建设效果更有针对性, 可实现配网项目建设的精准投资。

关键词: 配网建设; 精准投资; 多源数据融合; Elastic-net; 重要性排序

Elastic-net variable selection and its application to the distribution network investment decision

LUO Ting¹, LIU Xiaohui¹, CHENG Hongbo²

(1. School of Statistics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Screening important indices based on the historical construction of a distribution network to make targeted and precise investment decisions is an effective way of improving the effectiveness of network construction. This paper uses multi-source fusion technology to integrate the construction data and run data of different systems in the distribution network, and uses textual data extraction technology to structurally transform the project construction record. The extracted data can be screened based on an Elastic-net and the parameters of the Elastic-net are optimized based on the BIC criterion. In this way, the importance ranking of construction indices is obtained. From this ranking a distribution network construction investment decision-making model is established. The comparative analysis of different investment decision-making schemes shows that the construction effect of the proposed model is more pertinent, and can achieve precise investment in the construction of distribution network projects.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11971208), the Key Research & Development Projects of Jiangxi Province (No. 20202BBEL53008) and the Student Research Project of Jiangxi University of Finance and Economics (No. 20210915090654450).

Key words: distribution network construction; precise investment; multi-source data fusion; Elastic-net; importance ranking

0 引言

配电网直接面向用户, 具有电压等级多、网络结构复杂、设备类型多样、安全环境相对较差等特点, 在经济快速发展的背景下凸显了对其进行有效

优化的紧迫性。现有研究中除了从配网重构^[1-4]的角度分析优化问题外, 还基于其项目建设情况实现优化。该项目建设是完善结构、提升性能的重要途径。由于配电网覆盖面广、规模大, 对建设项目进行精准投资和科学决策, 通过合理的改造、扩容、新建项目提升配电网的供能品质, 是实现其资产有效管理的重要途径。同时, 因其建设项目多、任务重且投资规模大, 往往会导致投资方案难以抉择。

鉴于此, 很多学者基于配网投资决策问题提出

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(11971208); 江西省重点研发计划项目资助(20202BBEL53008); 江西财经大学学生科研课题资助(20210915090654450)

改进方案。从投资过程角度: 文献[5-7]以投资效益为导向构建投资决策模型; 文献[8]对投资全过程管控进行研究, 并从立项可研、设计招标、施工建设和竣工交付运行四个阶段构建多属性决策评价体系来决定投资方案; 文献[9-10]从投资风险评估的角度引入实物期权理论构建投资决策模型; 文献[11]从成本和收益的角度建立不确定性条件下的投资决策评估模型; 文献[12]则构建经济运行模型, 通过结合算法进行优化求解, 利用等效净收益来评价投资方案的经济性优劣; 文献[13]在考虑市场成员策略行为的前提下, 对引入投资决策的电力容量市场进行了建模与均衡分析; 文献[14]提出考虑输电电价核定和地市发展阶段的电网差异化投资策略。从指标角度: 文献[15]提出了一种综合 AHP-Entropy 和模糊综合评价法的综合评价方法; 文献[16]提出了一种面向综合能源系统的投资评价方法; 文献[17-18]考虑不同因素对配电网投资行为的影响; 文献[19-20]结合不同赋权方法建立投资效益综合评估模型; 文献[21]考虑各建设指标的前景值确定最优属性权重; 文献[22]将主客观组合赋权与证据推理相结合选择最佳决策。

除此之外, 文献[23-26]在建立投资评估模型时从不同角度考虑各指标的权重分配问题, 但并没有实际考虑到指标的重要性程度。基于配电网历史建设项目信息与运行状态信息, 构建易于解释、针对性强的精准投资决策模型有利于实现对建设项目的高效投资, 并为后续建设项目的规划提供指导依据。

项目的建设不同指标对配网运行效果的影响各不相同, 筛选出对运行状态改善关联性强的建设指标有利于采取针对性的建设措施。因此, 本文结合统计学中有关变量选择的 Elastic-net 方法^[27], 构建新的配网建设投资决策方法。该方法直接从配网故障的主要指标与各建设项目指标的相关关系的强弱入手, 筛选其中重要的指标进行建模。所提方法针对性强, 具有较好的解释性, 且 Elastic-net 本身已经较好地考虑了解释变量间的共线性问题, 在配网项目建设的投资决策中具有较强的适用性。

1 配网项目的多源信息融合

配网建设项目信息和运行状态信息分处于不同的系统, 且其中部分数据为非结构化形式, 需要先对不同系统的配网数据进行融合, 并结合特征提取的方法将部分文本数据结构化。根据项目建设成效评价的需要, 分别从设备台账提取配电资产统计情况, 从项目管理系统提取配网建设项目统计情况, 从供电服务指挥系统提取配网运行故障统计情况,

进而获取较为全面的配网工程项目相关信息。

由于配网建设的部分原始信息是以文字描述的形式存储的, 为便于后续统计分析, 利用文本提取技术将其转化为规范的数据形式, 原始文本信息通过信息匹配设置来抽取建设对象和建设长度, 从而形成规范化的描述, 最终所得到的数据形式更便于理解和分析。为便于统计、分析和对比配电网项目建设的成效, 本文以设备台账信息中的线路名称为主线将与之相关的项目建设信息及运行指标信息进行关联。具体地, 此处主要基于配网项目建设信息, 将 PMIS 配网设备基础信息通过不同的配网对象对建设项目和运行指标的相关数据进行匹配, 从而得到配网运行状态信息。图 1 为匹配相关部分中所涉及的指标名称。

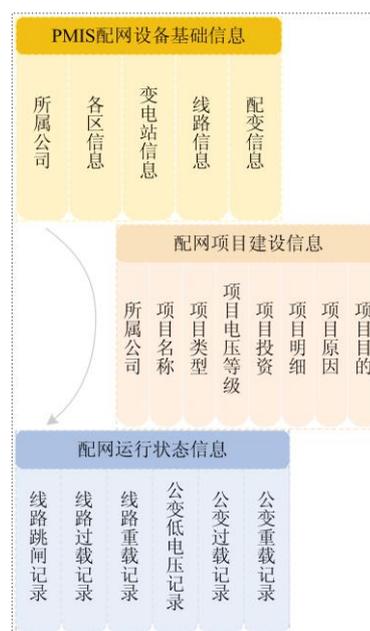


图 1 多源信息匹配指标体系图

Fig. 1 Index system of multi-source information matching

2 配网项目评价的 Elastic-net 变量选择

2.1 基于 Elastic-net 的变量选择方法

变量选择指从所有评价指标中选取对因变量具有解释能力的指标子集, 是从高维数据中提取重要信息的有用工具。现在常用的变量选择方法包括逐步回归、Lasso^[28]及 Elastic-net 等^[29]。

引入模型

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为反映配网运行状态的指标, 如跳闸率变化量、过载率变化量等; X_i 为各项目建设指标; p 为项目建设指标总数; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 为未知待估参

数； ε 为未被纳入考虑范围的其他因素。

作为变量选择的经典方法，Lasso(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)方法主要通过引入惩罚项，即待估参数 $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)$ 的 l_1 范数对模型系数进行收缩，并自动从模型中剔除无显著性影响的指标，其目标函数为

$$\arg \min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i \beta)^2 + \lambda \|\beta\|_1 \right\} \quad (2)$$

式中： N 为样本数，即配网历史建设数； λ 为非负调节参数，它主要用于控制稀疏参数估计的惩罚程度，进而达到限制 β 估计的可选范围。

然而，配网部分指标间存在较强的相关性(第 3 节将对此进行详细介绍)，基于 Lasso 方法可能会出现相关信息的重复选择问题。为解决多项关联指标的选择问题，本文在 Lasso 的基础上采用了 Elastic-net 法，其目标函数为

$$\arg \min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i \beta)^2 + \lambda(\alpha \|\beta\|_1 + (1-\alpha) \|\beta\|_2) \right\} \quad (3)$$

与 Lasso 比，Elastic-net 多了一项惩罚项：

$\|\beta\|_2 = \sum_{j=1}^p \beta_j^2$ ，用以控制项目建设指标间的共线性程度。引入该项的思想来源于岭回归中对协变量协方差阵迹的调整，是处理多重共线性的常用手段。 α 为自选参数，其存在可视为 Elastic-net 对岭回归和 Lasso 的某种弹性折中。当 α 为 0 时，Elastic-net 退化为岭回归；当 α 为 1 时，Elastic-net 即转化为 Lasso 回归。实际中，通常可视项目建设指标间的相关性程度来确定其具体取值。

2.2 基于 BIC 准则的调节参数选取方法

Elastic-net 应用的重点之一是调节参数 λ 的选取。当 λ 为 0 时，Elastic-net 估计退化为普通最小二乘估计，此时相当于没有对配网项目的建设指标进行任何筛选；当 λ 逐渐增大时，有部分建设指标将逐步被剔除出模型，特别地，当 λ 趋于无穷大时，所有项目建设指标均将被剔除，造成所谓的欠拟合现象。

λ 的取值是一个不断调整的动态过程，在进行变量选择时， λ 值的动态调整会出现一个现象：不同取值的 λ 最终筛选的变量个数相同。这种情况下，需结合 AIC、BIC 及广义交叉验证等准则进行确定，本文应用更为严格的 BIC 准则(Bayesian Information Criterion)。

BIC 准则又称贝叶斯信息准则，其不仅引入了惩罚项，考虑了模型的参数个数，同时还考虑了实

际样本的数量。基于 BIC 信息准则，当所选变量数相同时，选择使 BIC 值达到最小的 λ 作为最终调节参数^[30]。BIC 可定义为

$$B_{\text{BIC}} = k \ln(L) - 2 \ln(L) \quad (4)$$

式中： k 为所构建模型的参数个数，即配网的建设指标数，代表了模型复杂度； L 为似然函数。回归模型的 BIC 公式可表示为

$$B_{\text{BIC}} = N \log\left(\frac{R_{\text{RSS}}}{N}\right) + df \cdot \log(N) \quad (5)$$

式中： R_{RSS} 为示回归模型的残差平方和； N 为样本数量； df 为表示所选模型变量的自由度。

2.3 Elastic-net 方法的步骤

对各县公司配网各项建设指标数据应用 Elastic-net 进行变量选择，其具体步骤如下所述。

1) 确定自选参数 α 。根据建设指标间的相关性强弱确定 α ，相关性越强， α 值越小。

2) Elastic-net 估计。应用确定值 α 下的 Elastic-net 回归估计，得到基于不同调节参数取值下的变量选择结果，并绘制路径图将结果可视化。

3) 确定调节参数 λ 。基于上一步骤变量选择结果，当不同 λ 取值变量选择个数相同时，根据不同 λ 值分别进行 Elastic-net 估计，得到估计模型，并结合 BIC 准则选择 BIC 值最小时所对应的 λ 。

4) 各建设指标重要性排序。基于变量筛选的先后顺序确定变量重要性，先被剔除的变量重要性越弱。

5) 投资比例分配。根据指标属性和重要性分配投资比例，并比较单位情况下不同方案因指标权重差异所带来的影响。

6) 确定投资比例。根据各方案影响程度确定最终投资方案，获取最大收益。

3 Elastic-net 在配网投资决策中的应用

选取某地 2016 至 2019 年配网建设项目和运行状况数据。其项目建设及运行状态指标如表 1 所示，其中跳闸率变化量、过载率变化量以及重载率变化量这 3 个指标主要反映配网的运行状况，用其作为被解释变量进行评估；其余 13 项为反映配网项目建设的相关指标。

图 2 为基于 13 项建设指标数据得到的相关系数热点图。由图 2 可以看出，13 项建设指标中存在多项相关系数大于 0.8，即表明配网部分指标间存在较强的相关性，因此此处不宜采用 Lasso 对数据进行分析，而应使用如 2.1 节所提的 Elastic-net。

表 1 配网相关指标设置

Table 1 Related index setting of distribution network

指标名称	编码	指标名称	编码
新建项目数	X_1	改造变压器容量	X_9
改造项目数	X_2	新建 380 V 线路长度	X_{10}
项目投资额	X_3	改造 380 V 线路长度	X_{11}
配电台区项目数	X_4	新建 10 kV 线路长度	X_{12}
中压线路项目数	X_5	改造 10 kV 线路长度	X_{13}
10 kV 项目数	X_6	跳闸率变化量	Y_1
380 V 项目数	X_7	过载率变化量	Y_2
新建变压器容量	X_8	重载率变化量	Y_3

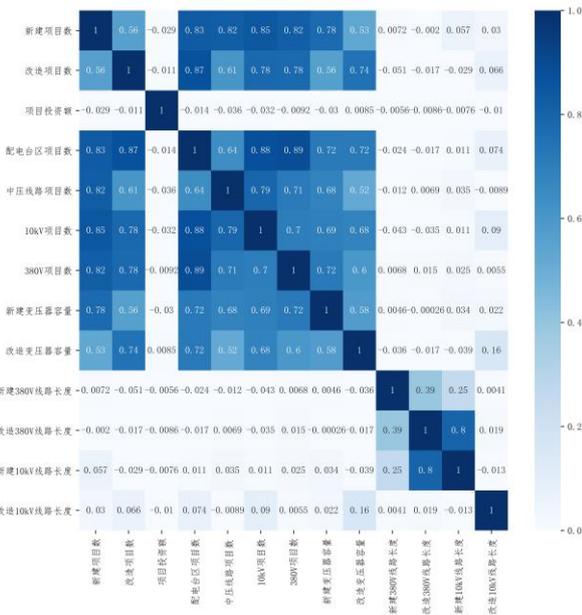


图 2 指标间相关系数热点图

Fig. 2 Heat map of correlation coefficient between indices

3.1 基于 Lasso 和 Elastic-net 的路径分析

由于 Elastic-net 回归是通过弹性惩罚实现 Lasso 回归与岭回归的结合, 因此根据现有配网建设数据的实际情况适当选取弹性变量 α 是十分重要的。由图 2 可以看出, 指标间存在较强的相关性, 考虑选取 $\alpha = 0.01$, 即偏向于岭回归的弹性惩罚, 以便较大程度地兼顾数据分析中的共线性问题。

以跳闸率变化量 Y_1 为例进行变量选择的路径, 如图 3 所示, 图中横坐标为 $\log(\lambda)$, 纵坐标为回归中各建设评价指标的回归系数。随着 $\log(\lambda)$ 取值的不断增大, 各建设评价指标的系数逐渐趋于 0, 说明进入模型的建设指标个数在逐渐减少, 也就是说, 对跳闸率变化量 Y_1 影响较大的变量随着 $\log(\lambda)$ 的增大而逐渐凸显出来。

通过对路径图进行对比, 当 λ 在同一水平时,

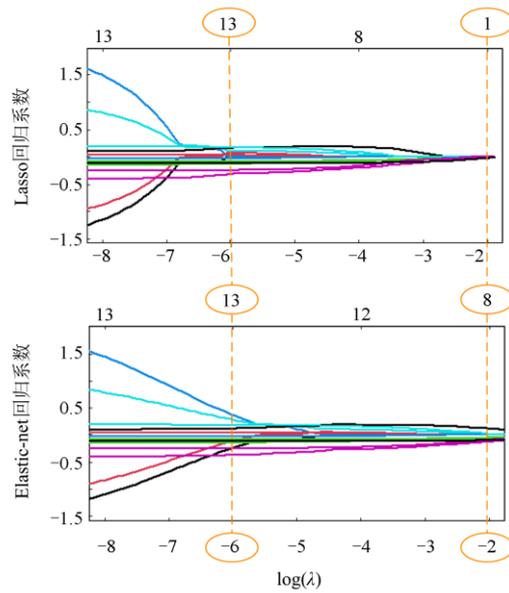


图 3 路径图

Fig. 3 Solution path

Lasso 的惩罚比 Elastic-net 的惩罚要更为严厉, 例如, 当 $\log(\lambda) = -2$ 时, Lasso 变量选择只留下一个变量, 而 Elastic-net 变量选择保留了 8 个变量。鉴于本文共有 13 个建设指标, 因此为了实际投资中指标存在的必要性, 仅考虑将选择后的建设指标个数降为原建设指标个数的 60%, 即 8 个建设指标及以下的情况。

为确定动态变量调整过程中调节参数的选择, 在 Lasso 和 Elastic-net 的基础上结合 BIC 准则所得的 λ 结果如表 2 所示。

表 2 基于 BIC 准则的 λ 取值

Table 2 Value of λ based on the BIC criterion

所选 变量个数	Lasso		Elastic-net	
	λ	BIC	λ	BIC
1	0.076 6	-292.941 7	7.659 3	-290.972 0
2	0.063 6	-289.489 7	6.978 9	-285.426 3
3	0.052 8	-286.536 7	6.358 9	-279.961 4
4	—	—	4.810 3	-275.162 8
5	0.043 8	-277.664 7	3.315 5	-271.085 0
6	0.022 9	-284.083 7	2.082 3	-268.088 3
7	0.020 8	-279.525 8	1.085 7	-267.080 1
8	0.009 9	-280.373 9	0.901 4	-262.894 3

3.2 变量选择结果分析

将表 2 展示的不同建设指标个数所对应的 λ 实际值分别代入 Lasso 和 Elastic-net 模型中, 可得到如表 3 所示的筛选结果。由表 3 可以看到, 当所选建设指标个数为 8 时, 除重合 X_3 、 X_5 、 X_6 等指标

表 3 基于跳闸率变化量 Y_1 的变量选择结果

Table 3 Results of variable selection based on the trip rate change Y_1

所选变量	Lasso							Elastic-net							
	8	7	6	5	3	2	1	8	7	6	5	4	3	2	1
X_1															
X_2															
X_3	√	√	√	√				√	√	√	√				
X_4								√	√						
X_5	√							√							
X_6	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
X_7	√	√	√					√	√	√					
X_8															
X_9	√	√	√	√				√	√	√	√	√	√	√	
X_{10}															
X_{11}	√	√													
X_{12}	√	√	√	√	√			√	√	√	√	√			
X_{13}	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

外, Lasso 选入 X_{11} , 而 Elastic-net 选入 X_4 。根据前面所介绍的相关性结果, 指标 X_{11} 和 X_{12} 的相关性较强, 存在多重共线性, 说明 Elastic-net 吸收岭回归的优势, 将剔除 X_{11} 保留 X_{12} , 这正是 Lasso 所忽略的部分。因此基于实际数据中各建设指标间多重共线性的实例数据, Elastic-net 方法具有更强适用性。

通过上述增大 λ 加大惩罚力度, 从而筛选出更多建设指标, 并对建设指标逐渐减少的趋势进行分析, 可得 13 个建设评价指标对因变量跳闸率变化量 Y_1 的影响程度排序, 其结果为

$$X_{13} > X_6 > X_9 > X_{12} > X_3 > X_7 > X_4 > X_5 > X_1 \approx X_{11} > X_8 > X_2 > X_{10}$$

同理, 可得到对过载率变化量 Y_2 的影响程度排序, 其结果为

$$X_{10} > X_8 > X_6 > X_{12} > X_1 \approx X_{11} > X_7 > X_2 \approx X_5 > X_3 > X_9 > X_{13} > X_4$$

对重载率变化量 Y_3 的影响程度排序, 其结果为

$$X_2 > X_7 > X_4 > X_{12} > X_{11} > X_5 > X_{13} > X_8 > X_3 > X_6 > X_1 > X_9 > X_{10}$$

相比于其他依据经验定义的投资方案, 经 Elastic-net 变量选择所得的指标重要性排序在实际项目投资中具有重要作用, 可以有效针对重要变量进行主要投资实现最大收益。

3.3 投资决策方案

在实际配网建设中, 有限的投资额需要分配到不同项目指标中进行建设, 如何根据各指标重要性程度分配投资比例是本小节所探讨的内容。

为突出指标重要性排序的优点, 本文首先将所

有指标分为两类: 一类是正向指标, 增加该建设指标的值会使因变量值增加; 一类是逆向指标, 增加该建设指标的值会使因变量值减少。

基于指标属性和指标重要性排序, 设置不同投资方案, 以 Y_1 为例的具体投资比例分配见表 4。方案 1 与方案 2 的差异体现在: 方案 2 首先基于指标属性优先对正向指标投入, 其次是逆向指标, 同时基于指标重要性排序分别对不同属性的单个指标分配投资比例, 最大程度上实现最优投资份额分配; 方案 3 和方案 4 则基于方案 2 仅考虑重要正向指标的影响。

基于该种分配模式可分别对其余两个评价指标设置分配比例, 从而根据投资分配比例 w_i , 并利用构建 Elastic-net 模型得到的回归系数 β_i , 构建如下投资决策模型。

$$\hat{Y}_j = \sum_{i=1}^{13} \beta_i w_i, \quad j=1,2,3 \quad (6)$$

考虑年度建设经费固定情况下, 分别采取表 4 中的 4 种投资分配策略, 所得建设结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出: 相比于未进行指标筛选而广泛投入的方案 1 和方案 2, 指标筛选后进行投入的方案 3 和方案 4 的建设效果更好, 其中同样基于平均投入, 筛选指标后进行平均投入的方案 3 比未筛选而平均投入的方案 1 的建设效果要高 150% 以上; 对于相同的建设指标, 考虑重要性差异的方案 2 比未考虑建设差异的方案 1 的建设效果要高 400% 以上。

表 5 中还给出基于未筛选指标而差异化投入的方案 2 情况下方案 3 和方案 4 的改善效果。按排序

表 4 总额固定情况下的投资分配

Table 4 Investment allocation under the fixed total amount

方案编号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方案特点	所有建设指标都投入, 权重均分	所有建设指标都投入, 按指标属性和排序结果确定投入程度	只对筛选出的正向建设指标投入, 各建设内容权重均分	只对筛选出的正向建设指标投入, 按排序结果确定投入程度
X_1	1/13	6/91	—	—
X_2	1/13	7/91	—	—
X_3	1/13	5/91	—	—
X_4	1/13	12/91	1/5	4/15
X_5	1/13	11/91	1/5	3/15
投资	X_6	1/13	2/91	—
分配	X_7	1/13	13/91	1/5
比例	X_8	1/13	9/91	1/5
	X_9	1/13	3/91	—
	X_{10}	1/13	8/91	—
	X_{11}	1/13	10/91	1/5
	X_{12}	1/13	4/91	—
	X_{13}	1/13	1/91	—

表 5 不同投资方案的建设效果对比

Table 5 Comparison of construction effects of different investment schemes

因变量	方案 1	方案 2	方案 3	改善效果	方案 4	改善效果
Y_1	-0.017 4	0.057 0	0.180 6	217%	0.208 3	265%
Y_2	-0.008 2	0.053 1	0.243 5	359%	0.165 6	212%
Y_3	0.007 0	0.185 3	0.477 8	158%	0.590 5	219%

结果确定投入程度, 仅筛选指标后平均投入的方案 3 比方案 2 的建设效果要高 150% 以上; 筛选指标后进行差异化投入的方案 4 比方案 2 的建设效果要高 200% 以上。

将该投资方案结果与实际配网建设相联系, 由此说明, 在有限的投资额情况下着重对基于 Elastic-net 筛选得到的重要指标进行主要投资, 对优化配网投资决策方案十分必要。

4 结论

本文基于多源信息融合方法并结合特征提取得到的配网数据进行 Elastic-net 变量选择, 筛选出对配网建设影响较大的指标, 并根据重要性排序设置不同投资分配比例进行对比分析, 得到如下结论。

1) Elastic-net 相比于 Lasso 更适用于存在明显相关性的配网数据, 并且基于该配网数据应用 Elastic-net 进行变量选择可以发现, 不同建设指标从其重要性程度和指标属性两方面考虑对于跳闸率变化量、过载率变化量和重载率变化量的影响具有明显不同。

2) 基于反映配网运行状态的 3 个评价指标, 各建设指标对其的影响程度有所不同。对于跳闸率变化量, 改造 10 kV 线路长度这一指标影响最大, 新建 380 V 线路长度这一指标影响最小; 对于过载率变化量, 新建 380 V 线路长度这一指标影响最大, 配电台项目数这一指标影响最小; 对于重载率变化量, 改造项目数这一指标影响最大, 新建 380 V 线路长度这一指标影响最小。

3) 基于建设指标重要性排序结果, 在有限投资额情况下着重对重要指标和正向指标进行主要投资, 并根据指标重要性分配投资比例, 可有效优化投资决策方案, 实现配网项目建设的精准投资。

参考文献

- [1] 赵嘉玉, 韩肖清, 梁琛, 等. 隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3624-3631.
ZHAO Jiayu, HAN Xiaoqing, LIANG Chen, et al. Optimal distribution network reconfiguration combining fuzzy membership with Euclidean distance[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3624-3631.
- [2] 张欣, 裴立耕, 王永庆, 等. 基于灰狼算法的多目标配电网重构[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 34-41.
ZHANG Xin, PEI Ligeng, WANG Yongqing, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on grey wolf algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 34-41.
- [3] 李珣, 唱友义, 梁晓赫. 新能源接入的配电网效益最优重构方法研究[J]. 控制工程, 2021, 28(5): 931-937.

- LI Yang, CHANG Youyi, LIANG Xiaohe. Research on an optimal reconfiguration method of distribution network benefits with new energy access[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(5): 931-937.
- [4] 李顺昕, 张姚, 岳云力, 等. 基于重构有效性和最优网架选择的配电网动态重构研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 30-37.
- LI Shunxin, ZHANG Yao, YUE Yunli, et al. Research on dynamic reconfiguration of distribution network based on reconstruction effectiveness and optimal network selection[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 30-37.
- [5] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-125.
- LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-125.
- [6] 王利利, 贾梦雨, 韩松, 等. 基于 TOPSIS-灰色关联度的农网投资效益与风险能力综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 76-83.
- WANG Lili, JIA Mengyu, HAN Song, et al. Synthesized evaluation of investment efficiency and risk ability of rural network based on TOPSIS-gray incidence[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 76-83.
- [7] 汪荣华, 杜英, 苟全峰, 等. 考虑输配电价改革的省级电网规划投资效率效益评估[J]. 电力建设, 2020, 41(11): 135-144.
- WANG Ronghua, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Evaluation of planning investment efficiency and benefit of provincial power grid considering the reform transmission and distribution prices[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(11): 135-144.
- [8] 王玲, 彭道鑫, 吴鸿亮. 电网企业投资全过程管控评价体系研究-基于二元语义的多属性决策分析[J]. 价格理论与实践, 2020(5): 106-109.
- WANG Ling, PENG Daoxin, WU Hongliang. Study on the evaluation system of grid enterprise investment management and control in the whole process[J]. Price: Theory & Practice, 2020(5): 106-109.
- [9] 王晶, 何永秀, 戴爱英, 等. 基于风险与实物期权理论的城市电网规划经济评价研究[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 168-173.
- WANG Jing, HE Yongxiu, DAI Aiyang, et al. Study of urban power grid planning economic assessment based on risk and real option theory[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 168-173.
- [10] 赵伟东, 刘敦楠, 牛东晓. 考量风险价值的微电网投资决策评估研究-基于实物期权模型的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2019(5): 109-112.
- ZHAO Weidong, LIU Dunnan, NIU Dongxiao. Research on microgrid investment decision evaluation considering risk value-an empirical analysis based on real option model[J]. Price: Theory & Practice, 2019(5): 109-112.
- [11] 王锦斌, 谭忠富, 张丽英, 等. 市场环境下载网投资风险评估的集对分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 91-99.
- WANG Mianbin, TAN Zhongfu, ZHANG Liying, et al. Power grid investment risk evaluation model based on set-pair analysis theory in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 91-99.
- [12] 季宇, 熊雄, 寇凌峰, 等. 基于经济运行模型的储能系统投资效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 143-150.
- JI Yu, XIONG Xiong, KOU Lingfeng, et al. Analysis of energy storage system investment benefit based on economic operation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 143-150.
- [13] 张妍, 陈启鑫, 郭鸿业, 等. 引入投资决策的电力容量市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 11-18.
- ZHANG Yan, CHEN Qixin, GUO Hongye, et al. Equilibrium analysis of power capacity market incorporating investment decision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 11-18.
- [14] 杨娜, 刘敦楠, 刘明光, 等. 考虑地市发展阶段的省级电网差异化投资策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 115-122.
- YANG Na, LIU Dunnan, LIU Mingguang, et al. Differentiated investment strategy of provincial power grid considering development stage of city region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 115-122.
- [15] 郑倩, 罗耀明, 刘鲲鹏, 等. 基于 AHP-Entropy 的电网营销服务网点投资合理性模糊综合评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 41-45.
- ZHENG Qian, LUO Yaoming, LIU Kunpeng, et al. Research on fuzzy assessment of investment rationality of electric supply network marketing service outlets based on AHP-entropy method[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 41-45.
- [16] 王祺, 卢艳超, 刘一江, 等. 面向综合能源系统的投资评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 20-27.
- WANG Qi, LU Yanchao, LIU Yijiang, et al. Investment

- evaluation method of integrated energy system[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 20-27.
- [17] 罗斌, 苏文珺, 张晓萱, 等. 电网投资关键影响因素及其传导路径研究[J]. *价格理论与实践*, 2019(5): 104-108, 133.
LUO Bin, SU Wenjun, ZHANG Xiaoxuan, et al. Research on the evaluation of new and old kinetic energy conversion of tourism economic growth[J]. *Price: Theory & Practice*, 2019(5): 104-108, 133.
- [18] 陈光, 戴攀, 周浩, 等. 电力投资风险评估中风险因素处理问题的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(1): 115-119.
CHEN Guang, DAI Pan, ZHOU Hao, et al. Study on processing of risk factors in risk assessment of electric power investment[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(1): 115-119.
- [19] 王国权, 乔琨, 侯荣均, 等. 配电网投资效益评价及投资项目的优选[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(12): 146-150.
WANG Guoquan, QIAO Kun, HOU Rongjun, et al. Evaluation on investment returns of distribution network and optimization of investment projects[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(12): 146-150.
- [20] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 48-56.
LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 48-56.
- [21] 王昭聪, 潘学萍, 马倩. 基于“奖优罚劣”线性变换改进前景理论的电网建设项目多属性投资排序方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(6): 2154-2164.
WANG Zhaocong, PAN Xueping, MA Qian. Multi-attribute investment ranking method for power grid project construction based on improved prospect theory of “rewarding good and punishing bad” linear transformation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(6): 2154-2164.
- [22] 栾乐, 周凯, 肖天为, 等. 基于证据推理的优质电力投资决策方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(17): 139-146.
LUAN Le, ZHOU Kai, XIAO Tianwei, et al. Premium power investment decision-making method based on evidence reasoning[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(17): 139-146.
- [23] 吴鸿亮, 李东伟, 王玲. 配网投资成效动态评价体系[J]. *南方电网技术*, 2019, 13(6): 44-49.
WU Hongliang, LI Dongwei, WANG Ling. Dynamic evaluation system of distribution network investment effect[J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(6): 44-49.
- [24] 徐斌, 马骏, 刘红新, 等. 基于配电网评价的投资分配方法[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2020, 53(3): 248-254.
XU Bin, MA Jun, LIU Hongxin, et al. Investment allocation method based on distribution network evaluation[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, 53(3): 248-254.
- [25] 张彦, 陈露东, 贺墨琳, 等. 基于影子价格和空间误差面板数据模型的配电网投资优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(4): 133-140.
ZHANG Yan, CHEN Ludong, HE Molin, et al. Investment optimization method of a distribution network based on shadow price and a spatial error panel data model[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 133-140.
- [26] WANG Qian, WANG Ronghua, WAN Mingyong, et al. Research on distribution network investment allocation method considering actual demand and investment benefit[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 680(1).
- [27] ZOU H, HASTIE T. Regularization and variable selection via the elastic net[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2005, 67(2): 301-320.
- [28] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the lasso[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1996, 58(1): 267-288.
- [29] FRIEDMAN J, HASTIE T, TIBSHIRANI R. The elements of statistical learning[M]. New York: Springer Series in Statistics, 2001.
- [30] BURNHAM K P, ANDERSON D R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection[J]. *Sociological Methods & Research*, 2004, 33(2): 261-304.

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-06-15

作者简介:

罗婷(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为时间序列分析、高维数据分析; E-mail: luoting_16@126.com

刘小惠(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为稳健统计、时间序列分析、统计计算; E-mail: liuxiaohui@jxufe.edu.cn

程宏波(1979—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为输变电设备(包括牵引供电设备)健康管理、故障诊断及预测、电网智能控制。E-mail: waitingbo@126.com

(编辑 姜新丽)