

## 基于非参数估计的无功电压控制响应规则辨识

尤金<sup>1,2</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 刘友波<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 胥威汀<sup>3</sup>, 苟竞<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 3. 国网四川省电力公司电力经济研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 由于传统分析难以准确把握电压、无功之间复杂的非线性关系, 使得调压措施给系统节点电压带来的电压偏移模糊不清, 导致调压后系统中某些节点电压进一步恶化。且传统电压无功分析依赖于模型建立的精度, 其负荷模型建立存在较大难度, 因此有必要通过电压对无功的响应数据来研究两者之间的关联关系。提出一种基于 Group-Lasso 的多场景下电压无功关联度分析方法, 挖掘系统负荷水平、无功激励与节点电压之间的函数关系。该方法能准确量化三者间的关联强弱, 且所得函数表达式具有较强的泛化能力。通过 IEEE 24、IEEE 118 节点系统标准算例验证了所提思路与方法的有效性, 为今后电压无功关联度分析提供了新的思路。

**关键词:** 电力系统; 电压无功分析; 场景应用; 数据挖掘; 非参数估计

### Identification of reactive power and voltage control response rules based on nonparametric estimation

YOU Jin<sup>1,2</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, LIU Youbo<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, XU Weiting<sup>3</sup>, GOU Jing<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, China; 3. Electric Power Economic and Technological Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Co., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** As traditional analysis is difficult to describe the complex nonlinear affiliation between voltage and reactive power accurately, the voltage offset caused by voltage control is ambiguous, leading to further deterioration of the voltage of some nodes in the system. Also, traditional voltage and reactive power analysis relies on the precision of model, however, there are still many problems in the establishment of load models, so it is necessary to study the correlation between voltage and reactive power by the voltage response data. This paper presents an identification of the relationship between voltage and reactive power in multi-scene based on Group-Lasso to mine the functional relation among load level of the system, reactive power and voltage. The method can quantify different impacts among the three precisely. The validity of the proposed method is verified by standard IEEE 24-bus system and IEEE 118-bus system. It provides a new way for the future analysis of connection between voltage and reactive power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51437003).

**Key words:** electric power system; voltage and reactive power; scene application; data mining; nonparametric estimation

## 0 引言

随着用电负荷的不断增长, 电力系统呈现出如下趋势<sup>[1]</sup>: 电网规模日益扩大、电网结构日趋复杂, 为传统的电网分析与控制带来诸多不便。终端数据量剧增为数据采集技术带来严峻挑战的同时, 也为电网运行控制提供了海量信息, 通过大数据分析技术对信息所包含的数据价值进行充分挖掘, 能够获

取不易发觉的电压无功关联知识。

目前地区电网最有效的控制手段是调节有载调压变压器抽头和投切并联电容器组, 统称为电压无功综合控制(VQC)<sup>[2]</sup>。主要分为以下三类。

1) 区图法。早期区图法是按电压水平综合控制抽头和电容器组的, 但未涉及无功补偿, 于是提出九区图法<sup>[3]</sup>, 该方法未考虑无功调节对于电压的影响, 临界状态下会导致设备的频繁动作<sup>[4]</sup>。为减少设备误动作, 衍生出两种思路: 一种是将设备误动作的临界区域划分出来单独处理, 形成诸如十三区

图法和十七区图法<sup>[5-6]</sup>的控制策略;另一种是将无功调节边界模糊化处理<sup>[7]</sup>。此外还有五区图法<sup>[8]</sup>。

2) 函数挖掘方法。这类方法通过构建一个优化目标函数,在约束条件下使该函数值达到最优,从而得到电压无功控制策略,包括线性规划法<sup>[9]</sup>、模糊动态规划法<sup>[10-11]</sup>等。

3) 机器学习方法。19世纪80年代出现了应用于电压无功控制协助模块的专家系统(ES)<sup>[12]</sup>,随着电网呈现出高维非线性特征,ES不再适用。人工神经网络(ANN)能够逼近任意非线性函数的优势得以重视<sup>[13-15]</sup>。其他算法如遗传算法<sup>[16-17]</sup>、决策树<sup>[18]</sup>等均运用在VQC策略上。

电压无功综合控制策略在一定程度上减少了无功功率在电网中的远距离传输,同时优化了变电站负荷端电压,但是对于每次控制行为给系统中非紧邻变电站的节点带来的电压偏移并不明确,在实际操作中表现为紧邻变电站的节点电压得到改善,非紧邻变电站的节点电压进一步恶化。这是因为改变分接头和投切电容器组的同时还伴随着发电机出力调整以及节点负荷的增减,仅考虑VQC的控制作用是不够全面的,并且由于电力负荷具有随机性、非线性、时变性、分散性等特征,使得负荷模型的建立不够准确,对于系统中线路、变压器的模型建立也可能存在偏差,因此传统电压无功控制的精确性仍有待提高,若能通过电压对无功的响应数据研究发电机出力、负荷场景和当地控制行为与系统各节点电压的潜在关联规则,将降低控制行为带来的盲目性,明确各类因素对系统电压分布带来的影响。

本文考虑数字建模方式,规避因电力系统建模而产生的误差,提出一种基于Group-Lasso的多场景下电压无功关联度分析方法,该方法通过历史数据的训练得到表征负荷场景、无功调节措施与节点电压关联关系的显式表达式,通过所得函数关系进行电压估计,根据估计效果确定对节点电压影响较大的因素,最后得出关于电压无功关联性的有效信息和结论。将上述思路和方法应用于标准算例,检验其有效性。

## 1 调压原理及样本生成

### 1.1 节点调压原理

以系统中变压器节点为例,说明采用各调压措施所依据的基本原理。

由于降压变压器低压侧的节点通过降压变与更大规模、更高电压等级的电网相连,因此可将变压器低压侧的节点视为边界节点,高压侧节点按等效电源处理。忽略变压器励磁支路及线路对地电容,

变压器和线路的参数用 $R+jX$ 表示,则负荷侧节点电压为

$$V_i = (V_G - \Delta V)/k = \left( V_G - \frac{PR + QX}{V_N} \right) / k \quad (1)$$

式中: $V_G$ 为高压侧电压; $\Delta V$ 为网络的电压损耗; $k$ 为变比; $P$ 、 $Q$ 分别表示高压侧有功功率和无功功率; $V_N$ 为高压侧额定电压。节点电压调整措施有如下三种:

- 1) 调节变压器抽头,改变变比 $k$ ;
- 2) 改善功率分布 $P+jQ$ ,减小电压损耗 $\Delta V$ ;
- 3) 调整网络参数 $R+jX$ ,减小电压损耗 $\Delta V$ 。

实际电网调度中最常用的方法是1)和2),图1(b)中在变压器低压侧母线增设了容量为 $Q_C$ 的电容器组,使得系统注入负荷侧的无功功率变为 $Q'$  ( $Q' = Q - Q_C$ ),此时电压损耗为

$$\Delta V' = \frac{PR + Q'X}{V_N} \quad (2)$$

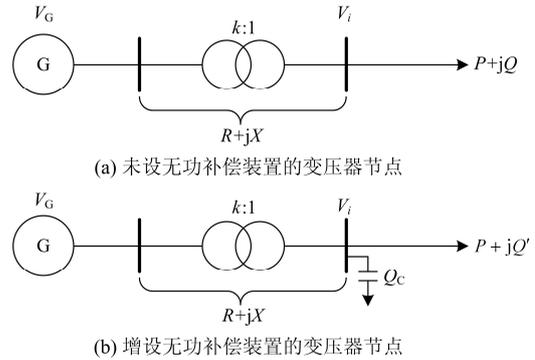


图1 变压器节点电压调整

Fig. 1 Transformer node voltage adjustment

显然 $\Delta V' < \Delta V$ ,从而降低了电压损耗,同时还提高了功率因数。本文主要着眼于变压器抽头调节和电容器组投切这两类本地控制行为。

### 1.2 系统调压原理

电力系统无功源发出的无功功率在任何时刻都与无功负荷和无功损耗之和相等,即

$$Q_{GC} = Q_{LD} + Q_L \quad (3)$$

式中: $Q_{GC}$ 表示系统发出的无功功率; $Q_{LD}$ 表示系统无功负荷; $Q_L$ 表示网络无功损耗。当负荷节点有功功率 $P$ 一定时,无功源送到负荷节点的无功功率为

$$Q = \sqrt{\left( \frac{EV}{X} \right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X} \quad (4)$$

当发电机电势 $E$ 一定时,则输送到负荷侧的无功功率 $Q$ 和系统运行电压 $V$ 之间的关系如图2曲线1所示,曲线2表示负荷无功电压特性,曲线1与

曲线2的交点 $a$ 所对应的电压值 $V_a$ 表示系统在该电压值下达到了无功平衡。

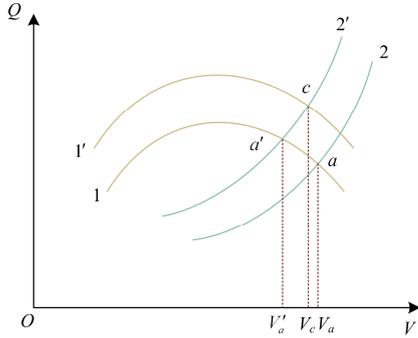


图2 系统电压调整原理图

Fig. 2 Schematic diagram of system voltage adjustment

随着负荷的增加, 曲线2将上移至曲线2', 此时的交点 $a'$ 代表新的无功平衡点, 并由此确定了系统运行电压 $V'_a$ , 显然 $V'_a < V_a$ 。若通过增投电容器组等措施使得无功源的无功电压特性曲线上移至曲线1', 此时的交点 $c$ 所确定的系统运行电压 $V_c$ 就能达到或者接近原来的运行电压 $V_a$ 。由此可见, 系统电压调整应尽量实现在额定电压下的无功平衡, 并增设必要的无功补偿装置。

### 1.3 样本产生原理

总体思路是根据不同负荷场景下变电站节点的电压和无功功率越限情况, 由九区图控制策略将电压无功逐步拉回至正常范围, 并记录下该过程中发电机出力、负荷场景、变压器抽头档位、电容器组投切量以及各节点电压。其中九区图控制策略按照固定的电压、无功(或变电站进线端功率因数)上下限将整个控制区域划分为九宫格的形式。我国能源部制定的《电力系统电压和无功电力技术导则SD325-89》规定: 变电所110~35 kV母线在正常运行时电压允许偏差范围为相应额定电压的[-3%, +7%], 对于220 kV及以下变电所, 由电网供给的无功功率与有功功率比值范围为[0, 0.33]。因此本文将电压上下限分别设为1.07和0.97, 将无功功率与有功功率的比值上下限分别设为0.33和0, 如图3所示。

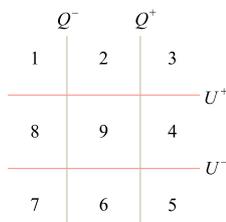


图3 基于九区图的VQC控制策略原理图

Fig. 3 Schematic diagram of VQC control strategy based on nine-area

图3中,  $U$ 表示变压器低压侧母线电压,  $Q$ 表示变压器高压侧无功功率,  $Q^-$ 表示无功下限,  $Q^-$ 越下限(1区、8区、7区)表示变电站向电网倒送无功,  $Q^+$ 表示无功上限,  $Q^+$ 越上限(3区、4区、5区)表示变电站从电网吸收无功。基于九区图的VQC控制策略的设备动作规则如表1所示。

表1 九区图控制规则

Table 1 Control rules of nine-area

区位	电压	无功	动作①	动作②
1	越上限	越下限	切电容器	降分接头
2	越上限	正常	降分接头	切电容器
3	越上限	越上限	降分接头	切电容器
4	正常	越上限	投电容器	
5	越下限	越上限	投电容器	升分接头
6	越下限	正常	升分接头	投电容器
7	越下限	越下限	升分接头	投电容器
8	正常	越下限	切电容器	
9	正常	正常	不动作	

注: 动作①先动作, 动作②只有在动作①用完时才启用。

### 1.4 样本产生机制

#### 1.4.1 负荷调整机制

负荷调整针对PQ节点进行。首先大致构造日有功负荷曲线和日无功负荷曲线, 如图4所示。

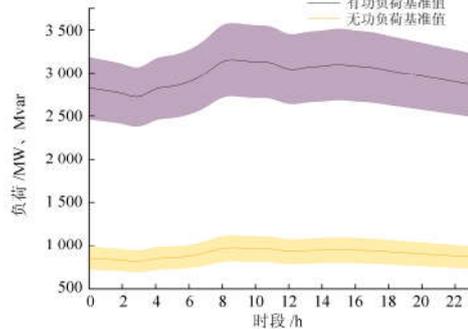


图4 日负荷曲线

Fig. 4 Curve of daily load

图中紫色曲线代表一天24h的有功负荷基准值, 橙色曲线代表对应的无功负荷基准值, 将两条曲线分别乘以1.2作为有功负荷和无功负荷的上限, 乘以0.8作为两种负荷的下限, 形成图4中的紫色有功负荷带和橙色无功负荷带。以24个时刻的有功负荷基准值和无功负荷基准值为初始负荷, 共生成24个初始负荷场景, 对每个时刻的初始负荷场景进行有功负荷和无功负荷的独立调整, 并且保证每次调整后的有功负荷和无功负荷都在各自负荷带内, 由此生成负荷场景样本。

#### 1.4.2 电压调节机制

在各个负荷场景中, 若变电站高压侧母线出现

无功功率越限或低压侧母线发生电压越限, 则按照表 1 的九区图控制规则进行调整, 反之则不动作。具体调节机制为: 对于每个负荷场景的 VQC 最大调节次数为 8 次, 仅对 PQ 节点进行无功补偿。电容补偿点均设在变电站的低压母线侧, 138 kV 节点每次补偿 4 Mvar。220 kV 变压器高压侧抽头调节范围为[0.9, 1.1], 每次调节步长为  $230 \times 0.0125$ 。由于 PV 节点属于发电机节点, 在实际运行中会自发地调整出力, 因此需将发电机出力记录下来作为影响节点电压的一类因素。

## 2 基于 Group-Lasso 的非参数估计原理

本文模型的输入是负荷场景、发电机出力、变压器变比以及电容器组投切量, 统称特征属性, 输出的目标属性为节点电压标么值。由于传统的电压无功分析往往涉及电力系统设备元件的建模, 而无论是数学模型还是物理模型都不能完整刻画真实情况, 模型本身的建立即存在误差。为了避免上述误差, 从电力数据入手, 采用统计学非参估计, 研究各类特征属性与目标属性之间的关联关系。

### 2.1 样本预处理

由于本文所涉及的数据维度较大, 首先应排除与节点电压关联性不强的特征属性, 采用非参数独立性筛选方法<sup>[19]</sup>(Nonparametric Independence Screening, NIS)进行弱关联特征属性的剔除, 其基本思路是将各特征属性对目标属性依次进行以 B-样条(Basis-Spline, BS)为基的非参数回归拟合, 计算相应的残差平方和(Residual Sum of Squares, RSS)并排序, RSS 越大说明特征属性与目标属性关联度越小, 最后根据关联度大小, 逐一剔除弱关联特征属性。假设存在如下样本集:

$$(X_1, X_2, \dots, X_p, Y_1, Y_2, \dots, Y_k) \quad (5)$$

式(5)为  $n \times (p+k)$  阶矩阵, 表示该样本集包含  $n$  条独立样本、 $p$  个特征属性以及  $k$  个目标属性。对每个特征属性  $X_j$  进行 BS 展开, 取  $X_j$  中第  $i$  条样本  $x_{ij}$  为例, 其 B-样条展开形式为

$$f_{Bij}(x_{ij}) = x_{ij1}a_{ji1} + x_{ij2}^2a_{ji2} + x_{ij3}^3a_{ji3} + \begin{cases} (x_{ij} - b_{j4})a_{ji4} & b_{j4} \leq x_{ij} < b_{j5} \\ (x_{ij} - b_{j5})a_{ji5} & b_{j5} \leq x_{ij} < b_{j6} \\ \vdots & \vdots \\ (x_{ij} - b_{jn})a_{jin} & x_{ij} \geq b_{jn} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $a_{ji1}, a_{ji2}, \dots, a_{jin}$  表示  $x_{ij}$  经过 BS 展开后各项前

的回归系数, 由最小二乘法求得;  $b_{j4}, b_{j5}, \dots, b_{jn}$  表示插值节点, 一般情况下在  $X_j$  的值域空间中按固定比例取值;  $n$  表示自由度, 它决定着  $f_{Bij}(x_{ij})$  所含项数,  $n$  最小为 3。

自由度的选取影响着回归模型的拟合精度, 为寻找最优拟合效果对应的自由度, 本文采用交叉验证(Cross Validation, CV)获取最优自由度, 求取属性  $X_j$  回归函数的最优自由度步骤如下所述。

Step1 设定自由度取值区间[3,  $n$ ], 初始化自由度  $d=3$ 。

Step2 将全部样本按顺序均分为  $m$  组, 初始化  $i=1$ 。

Step3 取自由度为  $d$ , 以第  $i$  组以外的  $m-1$  组样本为训练集进行非参数回归。

Step4 以第  $i$  组样本为测试集, 计算该回归模型的 RSS。

Step5 若  $i=m$ , 求得自由度为  $d$  时的  $m$  个 RSS 的均值, 作为自由度  $d$  的 RSS; 若  $i \neq m$ , 则  $i$  自增 1, 返回 Step3。

Step6 若  $d=n$ , 计算结束, 提取每个自由度对应的 RSS; 若  $d \neq n$ , 则  $d$  自增 1, 返回 Step2。

Step7 对 RSS 进行排序, 对应 RSS 最小者为该属性回归函数的最优自由度。

将各个特征属性按各自的最优自由度进行 BS 展开, 展开的简化形式为

$$f_{Bij}(x_{ij}) = \phi_{Bij1}(x_{ij1}) + \phi_{Bij2}(x_{ij2}) + \phi_{Bij3}(x_{ij3}) + \phi_{Bijn}(x_{ij}) \quad (7)$$

用所有特征属性对各目标属性做回归拟合, 计算其对应 RSS 值并由高到低进行排序, 其中以 RSS 值有明显下降的拐点为分界线, 分界线以前的特征属性表示与所考察目标属性关联性很弱, 需剔除, 保留分界线以后的特征属性作为后续步骤的输入样本。

对于 NIS 筛选后的特征属性, 根据实际经验, 某些特征属性变化幅度大, 例如负荷场景、发电机出力等, 某些特征属性变化幅度小, 例如变压器变比, 为了避免扭曲特征属性的实际影响力, 需要对所有特征属性作统一的无量纲化处理, 这里采用中心化处理方式。

$$\phi_{ijg}(x_{ijg}) = \frac{\phi_{Bijg}(x_{ijg}) - \phi_{Bijgmean}}{sd(\phi_{Bijg})} \quad (8)$$

式中:  $\phi_{Bijgmean}$  表示  $\phi_{Bijg}(x_{ijg})$  的均值;  $sd(\phi_{Bijg})$  表示  $\phi_{Bijg}(x_{ijg})$  的标准差; 这样得到的  $\phi_{ijg}(x_{ijg})$  就是中心

化后的特征属性展开项了。于是式(7)可改写为

$$f_{ij}(x_{ij}) = \sum_{g=1}^{d_f} \phi_{ijg}(x_{ijg}) \quad (9)$$

式中,  $d_f$ 表示最优自由度, 至此样本预处理完毕。

## 2.2 基于 Group-Lasso 的非参数估计

由 Tibshirani 于 1996 年提出的 Lasso(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)算法是一种基于 L1 范数的多元线性回归方法, 它能够很好地解决电力数据样本中存在的多重共线性问题, 同时能够防止模型对于训练集的过拟合, 使其对测试集具有较好的泛化能力。

假设经 NIS 筛选之后原始样本集变为  $(X_1, X_2, \dots, X'_p, Y_1, Y_2, \dots, Y'_k)$ , 其中第  $i$  条样本的线性回归模型为

$$y_{is} = \alpha + \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_{js} + \varepsilon_i \quad (10)$$

式中:  $y_{is}$  表示第  $s$  个目标属性的第  $i$  条样本;  $x_{ij}$  表示第  $j$  个特征属性的第  $i$  条样本;  $\beta_{js}$  表示该条样本中与目标属性  $y_{is}$  有关联的特征属性  $x_{ij}$  所对应的回归系数, 若有  $p$  个特征属性, 对应的回归系数矩阵为  $(\beta_{1s}, \beta_{2s}, \dots, \beta_{js}, \dots, \beta_{ps})^T$ 。

Lasso 在线性回归模型的基础上加入了一阶罚函数作为规则项, 其回归模型为

$$\beta^* = \arg \min_{\beta^*} \left[ \sum_{i=1}^n \left( y_{is} - \alpha - \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_{js} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_{js}| \right] \quad (11)$$

由于实际电力系统中各节点电压与 VQC 补偿手段之间存在着复杂的非线性关系, 而 Lasso 算法仅适用于线性回归, 于是 Huang 等人提出了用于可加模型多元非线性回归的 Group-Lasso 算法<sup>[20]</sup>。

Group-Lasso 回归模型通过将各特征属性的非线性函数相叠加来解决非线性问题。其可加模型为

$$y_{is} = \alpha + \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij}) \beta_{js} + \varepsilon_i \quad (12)$$

那么 Group-Lasso 回归模型可表示为

$$\beta^* = \arg \min_{\beta^*} \left\{ \sum_{i=1}^n [y_{is} - \alpha - \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij}) \beta_{js}]^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_{js}| \right\} \quad (13)$$

式中,  $\lambda$  称为惩罚参数, 在矩阵稀疏化的过程中, 当某些特征属性的惩罚参数  $\lambda$  压缩至 0 的时候, 这些特征属性模长的权值就变为 0, 说明这些属性被回归模型自动剔除了。将式(9)所示的预处理样本代入 Group-Lasso 回归模型式(13), 可得

$$\beta^* = \arg \min_{\beta^*} \left\{ \sum_{i=1}^n [y_{is} - \alpha - \sum_{j=1}^{p'} \sum_{g=1}^{d_f} \phi_{ijg}(x_{ijg}) \beta_{js}]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p'} |\beta_{js}| \right\} \quad (14)$$

式(14)称为 Group-Lasso 回归模型的具体应用模式, 最后该模型需要同时满足式(15)的可识别条件:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij}) \beta_{js} = 0 \quad (15)$$

基于 NIS 独立变量筛选及 Group-Lasso 非参数估计总体流程图如图 5 所示。

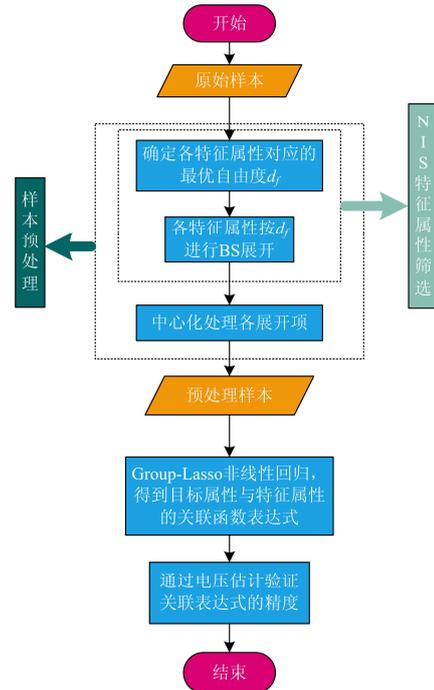


图 5 基于 NIS 和 Group-Lasso 的计算流程图

Fig. 5 Flowchart of calculation based on NIS and Group-Lasso

综上所述, Group-Lasso 算法能够处理 Lasso 算法所无法解决的非线性回归问题, 能在进行回归拟合的同时完成特征量筛选, 最终挖掘出对目标属性具有强解释性的特征属性。

## 3 算例分析

### 3.1 IEEE 24 节点系统分析

#### 3.1.1 基于 Group-Lasso 的回归拟合分析

以 IEEE 24 节点标准系统为例, 进行电压无功关联度分析, 其网络结构参数按照文献[21]给出, IEEE 24 节点系统结构如图 6 所示。

该算例仿真是基于 Java 平台, 通过 Java 程序调用 BPA 计算潮流实现的, 总共产生了 74 354 条样本, 经过 2.1 节筛选后, 样本包含 43 个特征属性、18 个目标属性, 具体属性见表 2 和表 3。

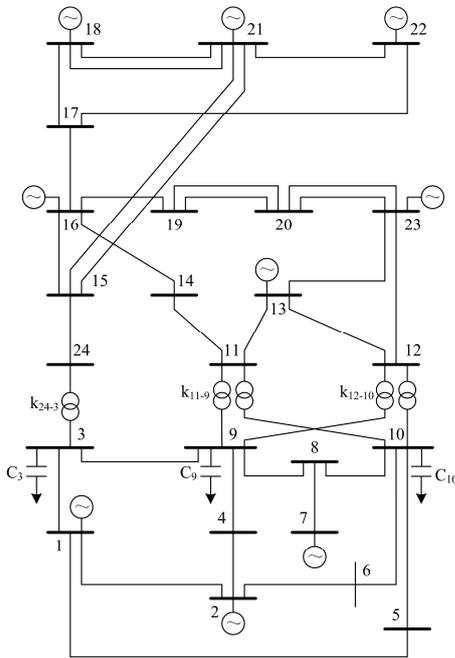


图 6 IEEE 24 节点系统结构图

Fig. 6 Structure of IEEE 24-bus system

表 2 样本特征属性

Table 2 Feature attributes of samples

编号	发电机出力	编号	负荷场景	编号	VQC
1/2	bus1-PQ	16/17	bus3-PQ	38	C <sub>3</sub>
3	bus2-Q	18/19	bus4-PQ	39	C <sub>9</sub>
4/5	bus7-PQ	20/21	bus5-PQ	40	C <sub>10</sub>
6/7	bus13-PQ	22/23	bus6-PQ	41	k <sub>24-3</sub>
8/9	bus16-PQ	24/25	bus8-PQ	42	k <sub>11-9</sub>
10/11	bus18-PQ	26/27	bus9-PQ	43	k <sub>12-10</sub>
12	bus21-Q	28/29	bus10-PQ	—	—
13	bus22-Q	30/31	bus14-PQ	—	—
14/15	bus23-PQ	32/33	bus15-PQ	—	—
—	—	34/35	bus19-PQ	—	—
—	—	36/37	bus20-PQ	—	—

注：发电机出力中的 PQ 分别代表有功出力和无功出力，负荷场景中的 PQ 分别代表有功负荷和无功负荷，VQC 中 C 代表电容补偿，k 代表变比，下标表示节点编号。

表 3 样本目标属性

Table 3 Target attributes of samples

编号	节点电压	编号	节点电压	编号	节点电压
1	bus1	7	bus8	13	bus15
2	bus2	8	bus9	14	bus16
3	bus3	9	bus10	15	bus17
4	bus4	10	bus11	16	bus19
5	bus5	11	bus12	17	bus20
6	bus6	12	bus14	18	bus24

再将预处理样本按数据对  $(x, y)$  的形式提供给式(14)进行参数训练，其中  $x$  代表 VQC 补偿措施的 BS 展开项， $y$  代表节点电压标幺值，就能得到 VQC

补偿措施与节点电压的显式函数表达式，举其中一例展示如下：

$$\begin{aligned}
 y_{i1} = & 0.08\phi_{i21}(x_{i21}) + 0.263\phi_{i22}(x_{i22}) + \\
 & 0.625\phi_{i23}(x_{i23}) + 0.512\phi_{i24}(x_{i24}) + \\
 & 0.986\phi_{i25}(x_{i25}) + 0.043\phi_{i31}(x_{i31}) - \\
 & 0.074\phi_{i32}(x_{i32}) - 0.268\phi_{i33}(x_{i33}) - \\
 & 0.489\phi_{i34}(x_{i34}) - 0.48\phi_{i35}(x_{i35}) + \dots - \\
 & 0.35\phi_{i(42)1}(x_{i(42)1}) - 0.178\phi_{i(42)2}(x_{i(42)2}) - \\
 & 0.395\phi_{i(42)3}(x_{i(42)3})
 \end{aligned} \tag{16}$$

而模型输出的就是节点电压拟合值，将得到的拟合值  $y_{\text{hat}}$  和实际观察值  $y$  按式(17)作 RSS 运算。

$$\text{RSS} = \sum_{i=1}^n (y - y_{\text{hat}})^2 \tag{17}$$

由式(17)得到的各节点电压 RSS 值如图 7 所示。

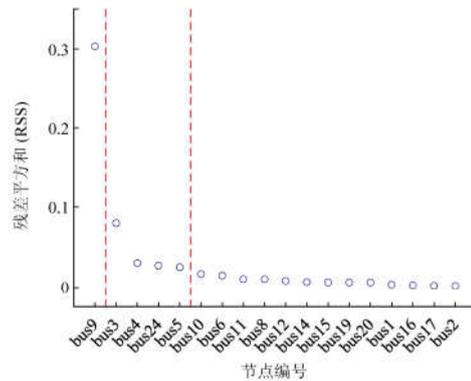


图 7 各节点电压的残差平方和排序

Fig. 7 Ranking of RSS of node voltage

从图 7 中可以看到 RSS 值最大不超过 0.35，最小值接近于 0，说明 Group-Lasso 回归模型对于训练集的拟合效果是很好的，为了直观展示节点电压拟合效果，将拟合值  $y_{\text{hat}}$  和实际观察值  $y$  以二维坐标  $(y_{\text{hat}}, y)$  形式打在二维平面上。限于篇幅不便将所有节点电压的拟合效果展示出来，遂以图 7 的 RSS 值中具有明显拐点的地方为界进行分段，分段处以虚线表示，共分为三段，在每段内取一个节点进行节点电压拟合效果展示，如图 8 所示。

图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)中均以  $y=x$  这条斜线为基准表征拟合效果的优劣，点越靠近该条斜线表示拟合效果越好，上述三幅图中 bus12 电压拟合效果最好，bus3 次之，bus9 最差，说明非参数回归拟合筛选出来的特征属性与 bus12 和 bus3 关联性较大，而与 bus9 关联性较小，仍选用 RSS 作为衡量关联度强弱的指标，以 bus12 为例展示各特征属性与其电压关联度的强弱排序，如图 9 所示。

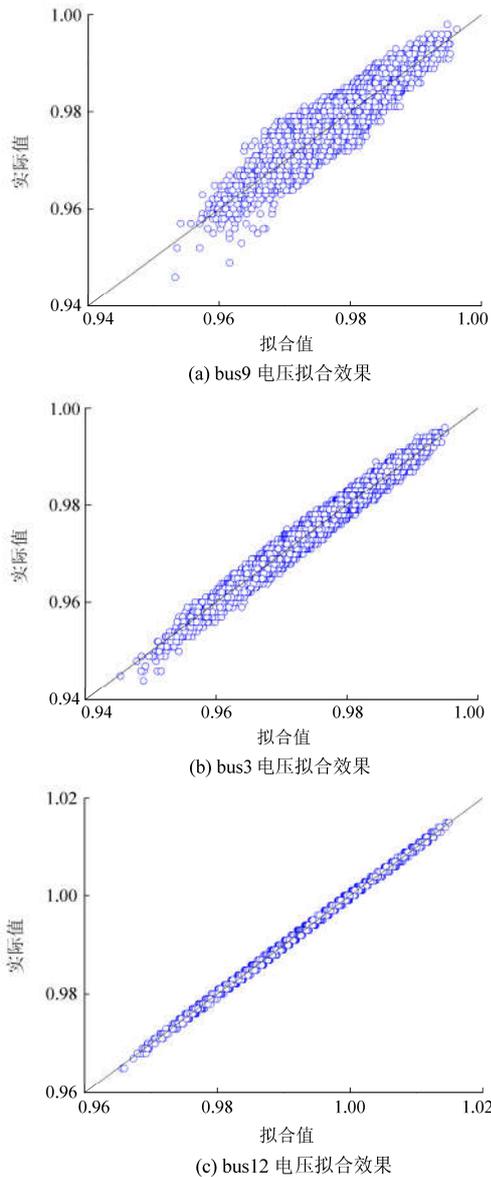


图 8 部分节点电压拟合效果展示  
Fig. 8 Partial node voltage fitting effect

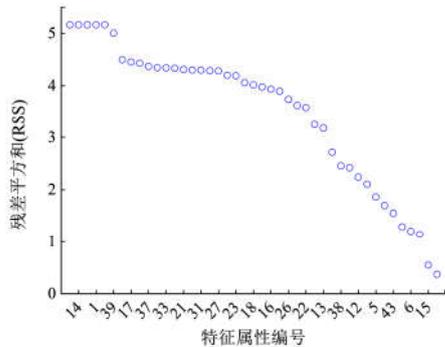


图 9 特征属性与 bus12 电压关联度强弱排序  
Fig. 9 Ranking of feature attributes associated with bus12 voltage

按照表 2 中特征属性的编号作为图 9 的横坐标, 纵坐标的 RSS 值表示各个补偿措施分别对 bus12 电压做拟合得到的残差平方和。从图 9 中不难看出, 与 bus12 电压关联度最强的两个特征属性的编号为 7 和 15, 查询表 2 可知两者分别为平衡节点 bus13 无功出力 and 发电机节点 bus23 无功出力, 结合 IEEE 24 节点系统结构图可以发现, bus13 和 bus23 都是距离 bus12 最近的无功源, 而 bus12-bus10 变比仅排在第 6 位, 说明在靠近无功源位置的变电站节点受无功源出力的影响是大于自身变比影响的。

将各特征属性对所考察节点电压的回归拟合效果做总体展示如图 10 所示。

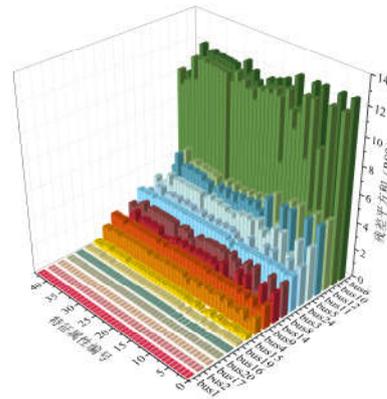


图 10 特征属性与系统节点电压的关联关系

Fig. 10 Feature attributes associated with node voltage

图 10 中每条柱状代表着一个拟合效果, 直观反映了各特征属性与系统各节点电压的关联度强弱, 将图 10 横坐标特征属性编号按 RSS 值升序排列, 如图 11 所示。

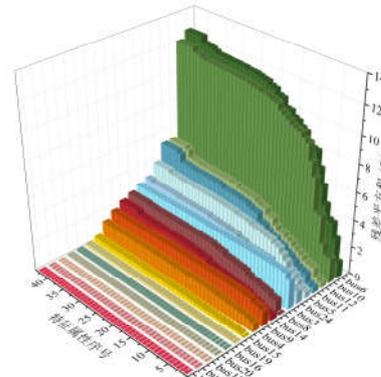


图 11 特征属性与系统节点电压关联度强弱排序

Fig. 11 Ranking of feature attributes associated with node voltage

图 11 中的横坐标表示 RSS 值由小到大排列的序号, 从电压拟合效果上看, 距离发电机越近的节

点, 其节点电压拟合效果越好, 而远离发电机的节点其拟合效果较差。根据图 11 整理出与系统节点电压关联关系排名前十的特征属性。

表 4 中的数字对应表 2 中各特征属性编号, 从总体数量来看, 关联性排前十的特征属性中约有 75% 属于发电机无功出力和无功负荷, 仅有 14% 属于发电机有功出力和有功负荷, 而变比约占 11%, 就无功功率所占份额来看, 该结果印证了无功功率是电压支撑这一结论。从排名分布情况来看, 为直观起见, 将表 4 内容整合为图 12。

表 4 与节点电压关联关系排名前十的特征属性

Table 4 Ranking of top 10 feature attributes associated with node voltage

(a)						
排名	bus1	bus2	bus3	bus4	bus5	bus6
1	3	7	16	3	2	3
2	5	5	2	18	3	2
3	7	3	12	5	29	29
4	2	15	17	7	7	7
5	15	11	3	2	5	5
6	13	13	15	15	15	15
7	11	12	13	9	9	9
8	29	29	6	12	6	6
9	12	6	11	6	42	22
10	9	22	38	19	12	42

(b)						
排名	bus8	bus9	bus10	bus11	bus12	bus14
1	5	3	3	7	7	7
2	3	2	2	15	15	15
3	7	5	29	9	9	9
4	2	7	7	6	6	6
5	15	39	5	42	42	42
6	24	29	15	43	43	43
7	9	15	9	3	3	12
8	29	27	6	5	5	3
9	6	9	42	29	29	5
10	12	12	12	12	12	13

(c)						
排名	bus15	bus16	bus17	bus19	bus20	bus24
1	12	13	13	15	15	12
2	9	11	11	6	6	16
3	6	12	15	9	9	41
4	15	15	12	12	42	9
5	13	7	7	13	12	15
6	11	6	6	11	43	6
7	33	9	9	35	38	7
8	41	42	42	42	13	3
9	16	43	43	43	11	5
10	7	16	16	7	37	2

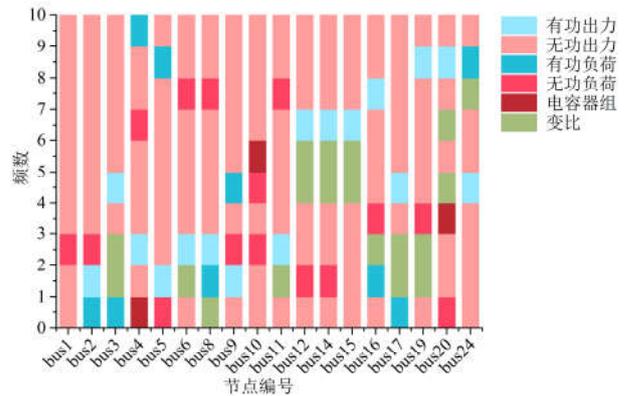


图 12 特征属性排名情况统计

Fig. 12 Ranking statistics of feature attributes

图 12 中每根柱条表示每个节点电压所提取出来的特征属性总量, 由于关注的是关联度排名前十的属性, 因此每根柱条高度为 10, 柱条内不同颜色的色块代表不同类型的特征属性, 色块越靠上表示该类属性与节点电压关联性越强, 例如左起第一根柱条, 其横坐标 bus1 表明该柱条体现的是各特征属性对 bus1 节点电压的关联度排名情况, 柱条由肉色块和红色块构成, 说明对 bus1 节点电压影响前十的因素主要是肉色块对应的发电机无功出力和红色块对应的无功负荷场景, 再观察色块分布可知, 10 个因素中排在第 7 名的都是发电机无功出力, 第 8 名是无功负荷场景, 最后两名是发电机无功出力。

不难看出, 发电机无功出力几乎占据了各柱条靠前的位置, 场景变量中的节点有功负荷和无功负荷也出现在排名靠前的位置, 而当地 VQC 措施的排名相对靠后, 这说明在综合考虑发电机出力和负荷场景因素的情况下, 节点电压受当地无功调节的影响可能不再是最大的, 往往受发电机无功出力调节影响更大。

### 3.1.2 节点电压的回归估计

经过训练, Group-Lasso 回归模型完成参数调校和目标属性拟合, 最终得到关于各节点电压与各特征属性之间关联关系的显式表达式, 通过该表达式就能在给定场景下估计出各节点电压。本节采用随机抽样的方式检验 Group-Lasso 回归模型的电压估计效果。

首先规定随机抽样的总体为 3.1.1 节中提到的 74 354 条样本, 抽样组数为五组, 每组样本分为训练集和测试集, 且保证训练集包含 70% 的样本量 (52 048 条样本), 测试集包含 30% 的样本量 (22 306 条样本), 训练集和测试集的样本都采用随机不重复

抽样的方式抽取, 得到相互对应的五个训练集和五个测试集。然后以训练集中的特征属性(负荷场景、发电机出力、变比、电容器组投切量)为输入、目标属性(节点电压)为输出去训练 Group-Lasso 回归模型, 得到五个待测试模型, 再将测试集的特征属性作为待测试模型的输入, 得到节点电压的估计值, 在同一坐标轴上直观体现 bus12 在某个测试组中电压实际值和估计值的贴合程度, 如图 13 所示。

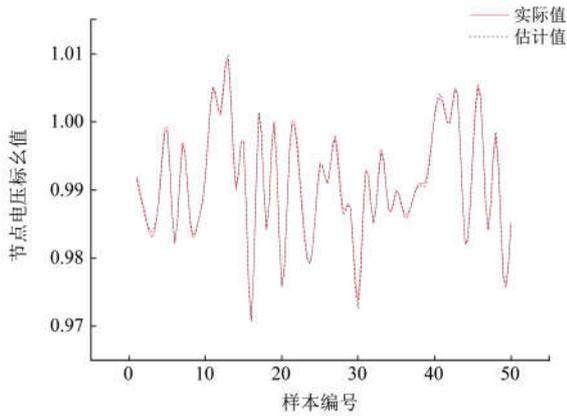


图 13 bus12 电压实际值与估计值

Fig. 13 Actual values and estimated values of bus12 voltage

从图 13 中可以看到黑色虚线与红色实线几乎是重叠的, 说明对 bus12 节点电压的拟合效果是很好的。接着计算所考察的 18 个节点在五组测试集中的最小误差、最大误差和误差均值, 如图14和图 15 所示。

从图 15 中不难发现各节点电压的误差绝对值最大为 0.015 左右, 最小贴近于 0, 并且各节点电压的误差均值维持在 0 值附近, 说明节点的电压估计值是精确的。最后求取这些估计值与节点电压实际值之间的 RSS, 如图 16 所示。

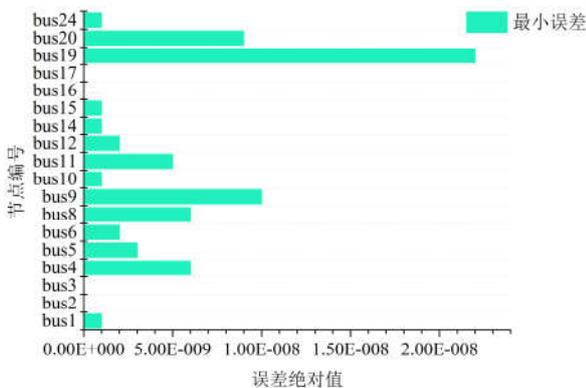


图 14 各节点电压的最小误差

Fig. 14 The minimum error of each node voltage

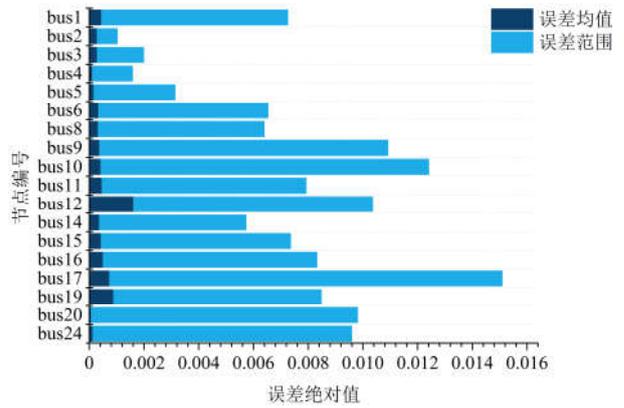


图 15 各节点电压的最大误差及误差均值

Fig. 15 The maximum error and the mean value of each node voltage

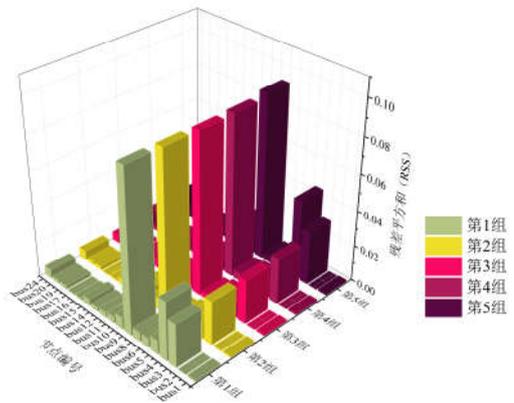


图 16 测试集节点电压估计效果

Fig. 16 Node voltage estimation effects of test sets

为便于观察, 将图 16 横坐标的节点编号按照 RSS 值升序排列, 如图 17 所示。

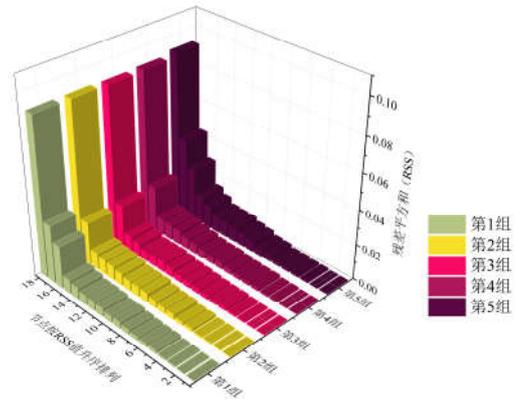


图 17 测试集节点电压估计效果排序

Fig. 17 Ranking of node voltage estimation effects of test sets

从图 17 中不难看出,五组测试集中电压估计最大 RSS 值误差不超过 0.1, 最小 RSS 值逼近于 0, 可见, 采用 Group-Lasso 回归模型进行系统节点电压估计的泛化能力是较为突出的。

### 3.2 IEEE 118 节点系统分析

为进一步验证所提思路的有效性, 拟采用更为庞大的 IEEE 118 节点系统进行电压无功关联分析。算例仿真平台以及潮流计算软件同 IEEE 24 节点系统, 总共生成 8 900 条样本, 样本包含 191 个特征属性、66 个目标属性。将样本总量的 75% 设为训练集、25% 设为测试集进行回归拟合分析, 由式(17) 可得预测集中各节点电压实际值与拟合值之间的 RSS, 排序如图 18 所示。

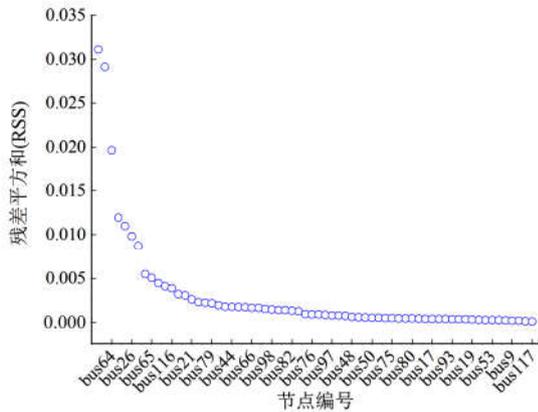
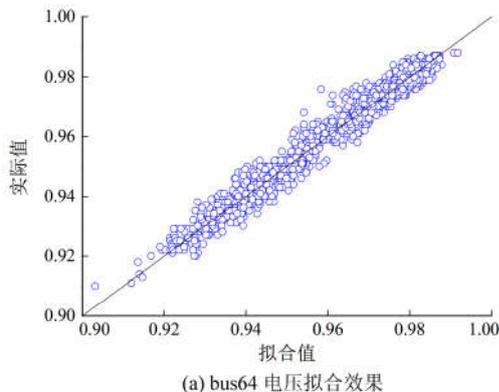


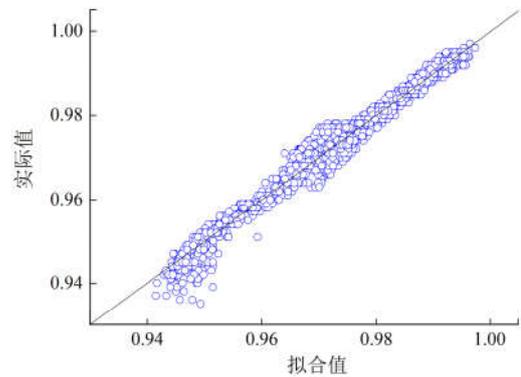
图 18 各节点电压的残差平方和排序  
Fig. 18 Ranking of RSS of node voltage

分别取 bus64、bus26、bus65 三个节点, 分别展示它们的电压拟合效果。

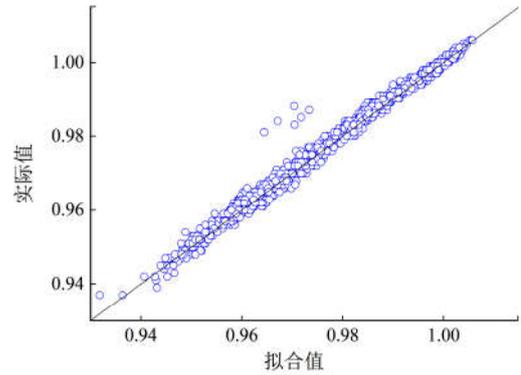
从图 18 和图 19 中不难看出, 随着算例规模的扩大, 用于拟合的信息量增多, IEEE 118 节点系统的拟合效果优于 IEEE 24 节点系统的拟合效果。仍选用 RSS 作为衡量关联度强弱的指标, 以 bus64 为例展示各特征属性与其电压关联度的强弱排序, 如图 20 所示。



(a) bus64 电压拟合效果



(b) bus26 电压拟合效果



(c) bus65 电压拟合效果

图 19 部分节点电压拟合效果展示

Fig. 19 Partial node voltage fitting effect

从图 20 中不难看出与 bus64 电压关联度较强的特征属性多为近区电源的无功出力, 其中 bus64 的并联电容补偿排在第七位。而 bus61—bus64 变比仅排在第 126 位, 说明在靠近无功源位置的变电站节点受无功源出力的影响是大于自身变比影响的。

将各特征属性对所考察节点电压的回归拟合效果做总体展示如图 21 所示。

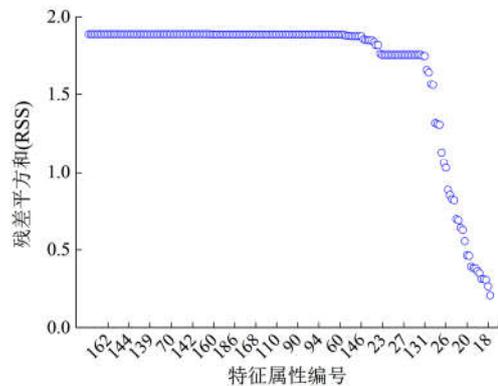


图 20 特征属性与 bus64 电压关联度强弱排序  
Fig. 20 Ranking of feature attributes associated with bus64 voltage

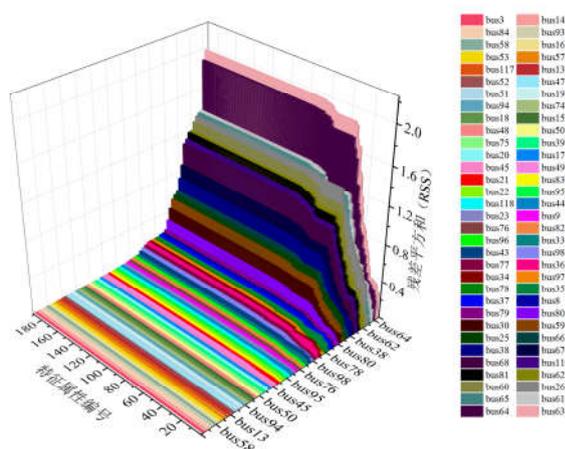


图 21 特征属性与系统节点电压关联度强弱排序

Fig. 21 Ranking of feature attributes associated with node voltage

图 21 中的横坐标表示 RSS 值由小到大排列的序号, 从电压拟合效果上看, 距离发电机越近的节点, 其节点电压拟合效果整体越好, 而远离发电机的节点其拟合效果越差。综上所述, 只要输入样本的值域空间包含必要的极限情况, 或者说输入样本所包含的信息足够全, 那么基于 Group-Lasso 回归模型的节点电压估计是较为准确的, 从而可以根据所处场景、发电机出力分布、某次抽头调节或电容器组投切估计出系统各节点电压的分布情况。

#### 4 结论

本文从数字建模方式出发, 绕过电力元件模型的建立, 借助统计学思想, 提出了一种基于多场景下的 Group-Lasso 电压无功关联度辨识方法, 将该方法分别应用于 IEEE 24 以及 IEEE 118 标准算例, 在综合考虑负荷场景因素和发电机出力情况下, 能够提取出对单个节点电压影响较强的负荷节点编号、发电机出力位置以及 VQC 补偿措施, 与当地控制相比较, 可以发现发电机无功出力调节对系统内部各节点电压的影响往往大于本地 VQC 补偿措施。除此之外还建立了各控制变量与目标节点电压之间的显示函数表达式, 经过验证, 所得函数表达式在电压估计方面具有较强的外推能力, 能够根据场景、发电机出力和当地 VQC 具体工况准确地估计出系统各个节点的电压, 并且无需频繁修正系数。该方法作为传统建模分析的辅助手段, 阐释了本地控制具有的盲目性, 挖掘出电压无功之间有意义的关联关系。

#### 参考文献

[1] 刘若凡, 刘俊勇, 刘友波, 等. 风电接入下断面极限传输功率运行规则的场景区聚类提取方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 69-74.  
LIU Ruofan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Scenario clustering method for extracting TTC operating rules of transmission corridor with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 69-74.

[2] 李剑辉, 林建熙, 吴国炳, 等. 省地电压调控失配机理与三维分析方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1396-1399.  
LI Jianhui, LIN Jianxi, WU Guobing, et al. Mechanism of voltage control mismatch between provincial power grid and regional power network and its three-dimensional analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1396-1399.

[3] 余涛, 周斌. 电力系统电压/无功控制策略研究综述[J]. 继电器, 2008, 36(6): 79-85.  
YU Tao, ZHOU Bin. A survey on voltage/reactive power control strategy for power systems[J]. Relay, 2008, 36(6): 79-85.

[4] 钟毅, 陈蕊. 地区电网 AVC 系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44.  
ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44.

[5] 胡斌, 彭爱国, 晏先云, 等. 基于变电站通讯管理机的电压无功控制装置[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 65-68.  
HU Bin, PENG Aiguo, YAN Xianyun, et al. Realizing substation voltage and reactive power control by using communication manager[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 65-68.

[6] 魏小淤, 杨洪耕. 基于控制设备动作状态诊断的区域电网电压无功控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 46-50.  
WEI Xiaoyu, YANG Honggeng. A new strategy for area voltage/var control based on operation-state-diagnosing method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 46-50.

[7] 许之晗, 刘晓川, 刘俊勇, 等. 变电站电压无功模糊控制系统的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(3): 15-19.  
XU Zhihan, LIU Xiaochuan, LIU Junyong, et al. Research on fuzzy control of substation voltage and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(3): 15-19.

[8] 孙文生, 张明军. 五区图变电站电压无功控制原理研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 39-41.

- SUN Wensheng, ZHANG Mingjun. Study on five-zone theory of substation VQC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 39-41.
- [9] SINA A, AEENMEHR A, MOHAMADIAN H. Power system voltage control using LP and artificial neural network[J]. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2012, 1(1): 123-127.
- [10] 陈爱东, 龚乐年. 模糊动态规划法在变电站电压无功控制中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 29-32.
- CHEN Aidong, GONG Lenian. Application of fuzzy dynamic programming (FDP) to reactive power and voltage control in a distribution substation[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 29-32.
- [11] HAQUE M T, NAJAFI S. Application of neuro-fuzzy dynamic programming to improve the reactive power and voltage profile of a distribution substation[J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology, 2007: 126-129.
- [12] LAFRAMBOISE J R P R, FERLAND G, CHIKHANI A Y. An expert system for reactive power control of a distribution system part 2: system implementation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1433-1441.
- [13] SUMATHI S, BANSILAL. Artificial neural network application for control of STATCOM in power systems for both voltage control mode and reactive power mode[C] // International Conference on Power Systems, December 27-29, 2009, Kharagpur, India: 1-4.
- [14] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美, 等. 基于神经网络的 SVC 电压稳定性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 67-71.
- MA Zhaoxing, WAN Qiulan, LI Hongmei, et al. A voltage stability control method of SVC based on neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 67-71.
- [15] 唐忠, 朱瑞婷, 张合栋, 等. 基于无功电流扰动的孤岛与扰动辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 159-165.
- TANG Zhong, ZHU Ruiting, ZHANG Hedong, et al. Identification research of the island and the disturbance based on reactive current disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 159-165.
- [16] 冷永杰, 张路寅, 赵建峰, 等. 基于多线程遗传算法的目标分级地区电网电压无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 37-41.
- LENG Yongjie, ZHANG Luyin, ZHAO Jianfeng, et al. Target classification reactive power optimal control of regional power grid based on multi-thread genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 37-41.
- [17] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
- HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [18] 朱利鹏, 陆超, 孙元章, 等. 基于数据挖掘的区域暂态电压稳定评估[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1026-1032.
- ZHU Lipeng, LU Chao, SUN Yuanzhang, et al. Data mining based regional transient voltage stability assessment[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1026-1032.
- [19] FAN Jianqing, FENG Yang, SONG Rui. Nonparametric independence screening in sparse ultra-high-dimensional additive models[J]. Journal of the American Statistical Association, 2011, 106(494): 544-557.
- [20] HUANG J, HOROWITZ J L, WEI F R. Variable selection in nonparametric additive models[J]. Annals of Statistics, 2010, 38(4): 2282-2313.
- [21] FENG C L, YUAN Y H. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2017-10-23

作者简介:

尤金(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统数据挖掘; E-mail: 1349635969@qq.com

刘俊勇(1963—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化及智能电网; E-mail: liujy@scu.edu.cn

刘友波(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为主动配电网规划与运行、复杂电力系统连锁故障风险评估及防御。E-mail: liuyoubo@scu.edu.cn

(编辑 周金梅)