

基于 LASSO 的变流器并网系统小扰动稳定降维分析

刘崇茹¹, 吕懿澎¹, 苏晨博¹, 郭昊¹, 倪京奥¹, 唐奕明¹, 卢远宏², 张杰³, 张竞月³,
姚蜀军¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510663; 3. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663)

摘要: 新型电力系统的高比例电力电子化特征使得系统建模分析出现“维数灾”难题。现有的模型降阶方法中, 理论分析法虽然针对性强, 但存在通用性不足的问题; 奇异摄动法的状态量选取原则同线性化模型相关, 无法准确把握完整动态特性。针对状态量选取原则进行改进, 利用数据驱动获取完整动态特性, 通过最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)进行状态量选取, 并根据物理信息补充重要状态量, 应用摄动法完成系统降维。最后, 在典型变流器并网系统进行应用, 降维系统能够反映原系统小扰动稳定特性, 证明了该方法的有效性。

关键词: LASSO 回归; 变流器并网系统; 小扰动稳定; 模型降维; 数据驱动; 摄动法

LASSO-Based Dimensionality Reduction Analysis for Small-Disturbance Stability of Grid-Connected Converter Systems

LIU Chongru¹, LÜ Yipeng¹, SU Chenbo¹, GUO Hao¹, NI Jingao¹, TANG Yiming¹, LU Yuanhong²,
ZHANG Jie², ZHANG Jingyue², YAO Shujun¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The high proportion of power electronics in new power systems introduces the "dimensionality disaster" challenge in system modeling and analysis. Among existing model order reduction methods, theoretical analysis approaches are highly targeted but suffer from insufficient universality. The state variable selection principle of the singular perturbation method is tied to linearized models, making it difficult to accurately capture comprehensive dynamic characteristics. To address this, the state variable selection principle is improved by leveraging data-driven techniques to obtain full dynamic characteristics. The least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) is employed for state variable selection, supplemented with critical state variables based on physical information. Perturbation methods are then applied to achieve system dimensionality reduction. Finally, the approach is tested in a typical grid-connected converter system, demonstrating that the reduced-order system can reflect the small-disturbance stability characteristics of the original system, validating the method's effectiveness.

Key words: LASSO regression; converter grid-connected system; small-disturbance stability; model dimensionality reduction; data-driven; perturbation method

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23B6008); 中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20232299)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U23B6008); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZBKJXM20232299).

0 引言

目前新能源渗透率持续提升,电力电子设备已成为新型电力系统的核心组成部分,发挥着重要作用^[1]。具体表现为:当前90%以上风电机组与光伏发电系统需通过全功率变流器实现电网接入^[2-3];柔性负荷、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、分布式电源及储能装置均依赖电力电子变流器实现灵活调控^[4-5]。与传统电网相比,高比例电力电子装置渗透的新型电力系统具有显著不同的特征:发电设备呈现出单机容量小、数量多且分布广泛的特点^[6],同时其阶数更高、动态响应过程也更加繁复^[7-8]。这些特性显著增加了新型电力系统建模和分析的难度。

模型降阶是降低模型复杂度的有效手段^[9-10]。当前主流的降阶方法主要包括基于理论分析的降阶法^[11-12]、奇异摄动理论降阶法^[13-15]、平衡实现理论降阶法^[16-17]、Krylov子空间降阶法^[18-19]以及本征正交分解法^[20-21]等。基于理论分析的降阶法通过对系统特性进行数学分析,保留主导特性实现降阶,如文献[11]提出一种变流器全状态反馈控制策略,引入全状态变量反馈,将变流器系统降阶为典型I型系统;文献[12]提出基于阻抗法的风电场等值方法,充分考虑了风电场的拓扑结构和内部动态特性,保持降阶模型的主导特性一致。奇异摄动理论降阶法则通过状态量选取实现降阶,在电力系统小信号模型中应用广泛。文献[14]针对多时间尺度系统的小扰动问题,基于奇异摄动理论提出多时间尺度系统的降阶原则,并在交直流电力系统中验证;文献[15]通过提出了基于主导度的分析方法,实现对奇异摄动降阶方法的改进,并应用于直驱风电场。需要注意的是,当系统阶数过高时,基于理论分析的降阶方法难以适用,且计算量呈指数增加。基于奇异摄动理论的降阶方法,需要通过筛选系统状态变量实现降阶,其降阶效率和准确度同选取原则直接相关,现有的通用选取方法需要对系统进行小信号线性化,这会增大系统降阶的误差。

LASSO回归算法引入了最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)^[22],通过采用模型系数的绝对值函数作为惩罚项,能够有效压缩模型参数,自动将不显著的系数压缩为0,实现变量的自动筛选^[23]。该方法可

以有效应用于高维系统的降阶,实现状态量的准确提取。文献[24]应用LASSO回归算法进行大型电力系统的特征提取,实现电力系统振荡模式的有效预测,并于IEEE 50机145节点系统进行了验证。文献[25]为提高数据驱动方法对复杂电力系统的适用性,利用LASSO回归从考虑不同目标的海量变量中选择和组合关键特征。文献[26]在风电场功率预测中,利用LASSO模型选择相关性较弱的特征以降低多重共线性,以提升预测准确性。现有的LASSO回归模型降阶方法,大多用于预测模型的状态量筛选,较少针对仿真分析的模型进行降阶,且鲜有应用于变流器降阶。

针对上述问题,本文提出一种基于LASSO回归的变流器并网系统小扰动稳定降维分析方法。与传统奇异摄动法依赖线性化模型完成状态量筛选不同,本文所提方法基于数据驱动获取系统完整非线性动态响应,再通过LASSO回归实现关键特征筛选,从根源上避免了线性化环节引入的模型误差,可更精准地把握系统全动态特性。具体而言,该方法首先利用LASSO回归算法量化不同状态量对系统动态响应的影响程度,完成主导状态量的初步筛选;其次结合电力系统物理机理认知,补充具有明确物理意义的关键状态量;最终基于摄动理论完成系统降维建模。通过在跟网型变流器、构网型变流器及多机并联变流器等典型并网场景开展验证分析,结果表明降维系统可精准复现原系统的小扰动稳定特性,充分证明了所提方法的有效性与适用性。

1 基于LASSO回归的状态量筛选

本文采用LASSO回归算法进行系统状态量筛选,该算法应用广泛、原理相对简单,可以实现数据的降维以及特征提取。

1.1 LASSO回归模型

对于一般的线性回归方程表达如式(1)~(3)所示。

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1)$$

$$E(\varepsilon) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Cov}(\varepsilon) = \sigma^2 I \quad (3)$$

式中: Y 为 $n \times 1$ 的观测向量; X 为 $n \times p$ 的设计矩阵; β 为 $p \times 1$ 未知参数向量; n 为观测样本数量; p 为变

量数量； ε 为 $n \times 1$ 的随机误差向量； $E(\cdot)$ 为数学期望函数； $Cov(\cdot)$ 为协方差函数； σ^2 为误差项方差； I 为单位矩阵。

式(1)为回归方程基本表达式，式(2)–(3)为基本假设条件，需满足残差项的期望 $E(\varepsilon)$ 为 0，且误差项无相关性。

为估计参数向量 β 可以采用最小二乘法，其思想是即使得误差 $\varepsilon = Y - X\beta$ 足够小，样本的损失也会尽可能小。以样本损失为目标函数 $Q(\beta)$ 时，有：

$$Q(\beta) = \|\varepsilon\|^2 = \|Y - X\beta\|^2 = (Y - X\beta)^T(Y - X\beta) \quad (4)$$

为使得 $Q(\beta)$ 最小，其解的估计值 $\hat{\beta}$ 如下。

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

式中： $\|\cdot\|^2$ 为 2-范数的平方； X 和 X^T 分别为设计矩阵及其转置矩阵； Y 为观测向量。考虑式(1)的线性模型 $Y = X\beta + \varepsilon$ ，当 $n > p$ 且矩阵 X 的秩 $rank(X) = p$ 时， $X^T X$ 可逆，此时最小二乘估计量 $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$ 是 β 的最佳线性无偏估计；当 $n < p$ 时， $rank(X) \leq n < p$ ， $X^T X$ 为奇异矩阵，最小二乘解不唯一，参数向量 β 不可识别。

针对该问题，Tibshirani 于 1996 年在其开创性研究中首次提出了 LASSO 算法^[22]。从数学形式上看，LASSO 回归通过传统最小二乘目标函数 $Q(\beta)$ 基础上增加 L_1 正则化项（即系数向量的 1-范数），实现了变量选择与参数估计的同步优化。

$$Q(\beta) = \|Y - X\beta\|^2 + \lambda \|\beta\|_1 \quad (6)$$

式中： λ 为惩罚参数，取值越大惩罚力度越强，反之越弱； $\|\cdot\|_1$ 为 1-范数。

式(6)由两部分组成：第一项为损失函数，用于衡量模型拟合优度；第二项为惩罚函数，其核心功能是实现变量选择。通过优化该目标函数可获得具有特定统计特性的回归系数估计值 β 。值得注意的是该估计值的性质与惩罚项形式直接相关。此外，式(6)对应的约束条件可表示为：

$$\begin{aligned} \arg \min & \|Y - X\beta\|^2 \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^p |\beta_j| \leq s \end{aligned} \quad (7)$$

式中： β_j 为 β 的第 j 个元素数值； s 为与 λ 对应的约束参数。

调节参数 s 的取值直接影响模型系数的稀疏性

程度：当 s 趋近于 0 时， L_1 正则项的约束作用增强，导致更多系数被压缩至精确为 0，从而实现更强的变量选择效果；当 s 趋近于 $+\infty$ 时，正则化约束效应逐渐减弱，模型趋近于无约束的最小二乘估计。通过系统性地调整 s 的取值可以精确控制系数向量的稀疏程度。

1.2 模型求解及参数估计

Efron 等人^[27]在 2004 年提出了最小角回归 (least angle regression, LARS) 算法，构建了一种创新的分段线性求解路径。该算法通过逐步选择与当前残差具有最大相关性的变量，并在已选变量构成的子空间中沿角平分线方向更新解路径，从而有效解决了 LASSO 回归的求解问题。特别地，该方法通过约束回归系数的符号一致性，确保了与 LASSO 解的等价性^[28]。

β' 的近似解如式(8)所示。

$$\hat{\beta} = (X^T X + \lambda W)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

式中： $W = \text{diag}(|\hat{\beta}_1|, |\hat{\beta}_2|, \dots, |\hat{\beta}_p|)$ 为对角矩阵， $|\hat{\beta}_j|$ 为 $\hat{\beta}$ 的第 j 个元素绝对值； W 为矩阵 W 的广义逆。

在式(7)中，求解 s 的值至关重要，因为约束参数 s 的大小将对回归系数是否为 0 起到关键的作用， s 甚至直接决定了约束到 0 的系数的数量，并且还直接决定回归系数的估计结果。

本文采用 Mallows 提出的 CP 准则^[29]作为模型选择标准，通过最小化各影响因素的 CP 统计量来确定最优正则化参数 s 。该准则在实现变量选择的同时，能够有效提升模型预测精度。统计量 C_p 的计算公式如式(9)–(10)所示。

$$C_p = \frac{RSS(s)}{\sigma_0^2} - n + 2p \quad (9)$$

$$RSS(s) = \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j(s))^2 \quad (10)$$

式中： C_p 为统计量； n 为样本数量； p 为变量数量； $RSS(\cdot)$ 为残差的平方和，其值与正则化参数 s 关系密切； σ_0^2 为全模型下普通最小二乘法的方差； Y_j 和 $\hat{Y}_j(s)$ 分别为第 j 个样本的观测值和估计值。

通过上述的分析可知，LASSO 回归是在原目标函数的基础上加了惩罚项，这会从整体上提升预测的精确度。惩罚函数会使得一些相关性不强的因素的回归系数压缩到 0 从而达到变量选择的目的。

2 变流器并网系统建模

本节介绍了典型的跟网变流器、构网变流器模型,并推导了多变流器并网的公共连接点(point of common coupling, PCC)电压电流的方程形式,为后续模型验证提供了理论基础。

2.1 跟网型变流器并网系统

图1所示为连接至弱交流电网的跟网型变流器单相电路模型^[30],其中: L_g 、 C_r 和 L_r 分别表示LCL滤波器的网侧电感、电容和变流器侧电感,弱交流电网由恒定电压源 v_s 与大电阻阻抗 Z_s 串联表示,电网阻抗 Z_s 为电感 L_s 与电阻 r_s 的串联,电抗器阻抗 L_g 和 L_r 的寄生电阻分别为 r_g 和 r_r , r_c 为 C_r 的阻尼电阻。 C_d 和 R_d 分别为跟网型变流器的直流链路电容和负载电阻, v_s 的幅值和频率分别为 V_{sm} 和 ω_0 , v_g 为PCC点电压, v_r 为 C_r 与 r_c 两端电压。 v_o 为LCL滤波器输出电压, v_{dc} 为变流器直流链路电压。 v_g 与 v_s 的相位差定义为 δ , v_{gm} 表示 v_g 幅值, i_g 和 i_r 分别为 L_g 和 L_r 的电流。上述所有变量均在abc坐标系下表示(如 i_g 代表 i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 三相电流),其dq坐标系分量表示为 i_{gd} 和 i_{gq} 等。

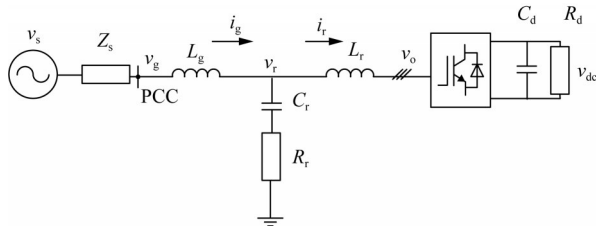


图1 跟网变流器与交流电网连接的单相电路图

Fig. 1 Single-phase circuit model of a grid-following converter connected to an AC grid

本文针对并网型PWM变流器的展开研究,图2给出了其在dq旋转坐标系下的控制结构框图。系统采用同步参考系锁相环实现电网同步,其中 k_p 和 k_i 分别为锁相环比例和积分调节系数, ω 为锁相环输出的电网角频率。

在控制架构方面,系统采用典型双闭环控制结构,其控制目标如下:

1)电压外环以直流侧电压 v_{dc} 为控制目标,其PI调节器的比例和积分系数分别为 α_p 和 α_i ;

2)电流内环以dq轴电流 i_{gd} 和 i_{gq} 为控制目标,相应PI调节器的比例和积分系数分别为 β_p 和 β_i 。

考虑到实际系统的慢动态特性,本文将数字控

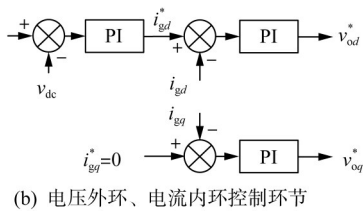
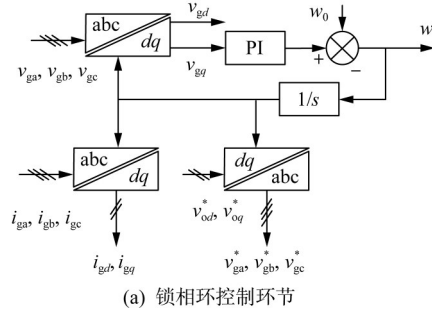


图2 并网变流器的dq坐标系中的控制框图

Fig. 2 Control block diagram in the dq-frame for the converter

制延时环节 $\exp(-sT_d)$ 近似处理为一阶惯性环节 $1/(sT_d+1)$,其中等效延时时间常数 $T_d=1.5T_{ctr}$ (T_{ctr} 为控制系统采样周期)。该延时环节的输入量为dq轴电压指令 v_{od} 和 v_{oq} 。

该变流器系统具体状态方程共包含14阶状态量,可以表示为:

$$\mathbf{u}_{GFL} = \begin{bmatrix} y_v & v_{dc} & y_{id} & y_{iq} & v_{od} & v_{oq} & y_w & \delta & i_{rd} & i_{rq} & v_{cd} & v_{cq} & i_{gd} & i_{gq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: y_v 为电压环的控制状态量; v_{dc} 为直流电压; y_{id} 和 y_{iq} 分别为电流环的dq轴控制状态量; v_{od} 和 v_{oq} 分别为变流器出口dq轴电压; y_w 为PLL环节的控制状态量; δ 为PCC点电压 v_g 同交流电压 v_s 的相角差; i_{rd} 和 i_{rq} 分别为变流器出口dq轴电流; v_{cd} 和 v_{cq} 分别为滤波电容dq轴电压; i_{gd} 和 i_{gq} 为交流电源侧dq轴电流。

2.2 构网型变流器并网系统

图3所示为连接至弱交流电网的构网型变流器单相电路模型,其基本结构同图1的跟网型变流器并网系统一致。直流侧的负载电阻由可控微源替代,保持直流侧电压恒定。

在本文的模型中,采用经典下垂控制^[31-33]。具体控制结构如图4所示。包含频率/电压计算模块,以及电压电流双闭环模块。

频率/电压计算模块用于模拟传统发电机的下垂特性。在双闭环控制模块中,电压外环以 v_{rd} 、 v_{rq} 为控制目标,电流内环以 i_{rd} 、 i_{rq} 为控制目标。

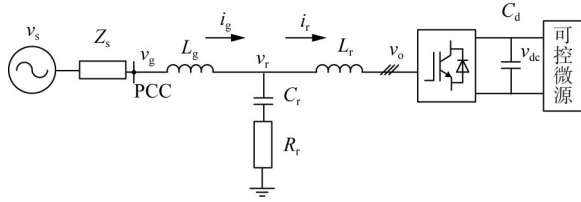
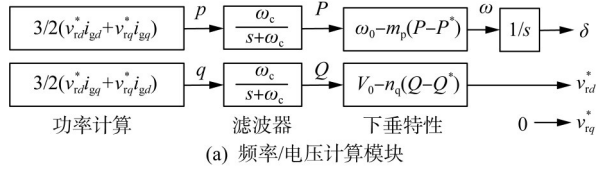
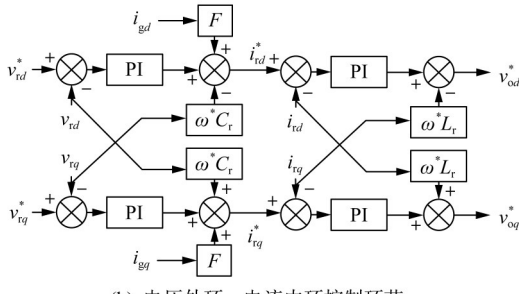


图3 构网变流器与交流电网连接的单相电路图

Fig. 3 Single-phase circuit model of a grid-forming converter connected to an AC grid



(a) 频率/电压计算模块



(b) 电压外环、电流内环控制环节

图4 构网变流器的dq坐标系中的控制框图

Fig. 4 Control block diagram in the dq-frame for the grid-forming converter

该变流器系统具体状态方程共包含 13 阶状态量，可以表示为：

$$\mathbf{u}_{\text{GFM}} = [\delta \ P \ Q \ i_{td} \ i_{tq} \ i_{gd} \ i_{gq} \ v_{td} \ v_{tq} \ y_{vd} \ y_{vq} \ y_{id} \ y_{iq}] \quad (12)$$

式中： δ 为PCC点电压 v_g 同交流电压 v_s 的相角差； P 和 Q 为变流器出口有功功率和无功功率平均值； i_{td} 和 i_{tq} 分别为变流器出口dq轴电流； i_{gd} 和 i_{gq} 分别为交流电源dq轴电流； v_{td} 和 v_{tq} 分别为变流器输出dq轴电压； y_{vd} 和 y_{vq} 分别为电压环的dq轴控制状态量； y_{id} 和 y_{iq} 分别为电流环的dq轴控制状态量。

2.3 多变流器并网系统

图5为多变流器并网模型，其基本结构同图1的跟网型变流器并网系统一致，不同变流器通过PCC点接入电网。将不同变流器转换到同一参考坐标系下，即可针对多变流器系统进行理论分析。

多变流器并网系统可视为交流电网与多个变流器子系统的互联体系，PCC点承担着各子系统间交互的核心作用，下边对并网点电压电流进行推导。

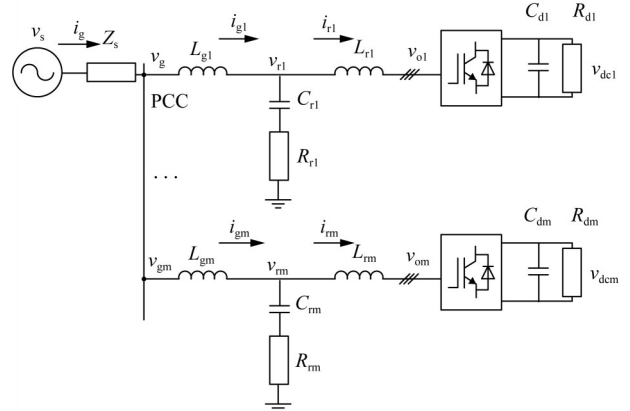


图5 多变流器与交流电网连接的单相电路图

Fig. 5 Single-phase circuit model of multiple converters connected to an AC grid

对于一个具有 m 条变流器支路并网的系统，并网点电流的dq轴分量 i_{gd} 和 i_{gq} 由支路电流叠加而成：

$$\begin{cases} i_{gd} = \sum_{j=1}^m i_{gdj} \\ i_{gq} = \sum_{j=1}^m i_{gqj} \end{cases} \quad (13)$$

式中 i_{gdj} 和 i_{gqj} 为第 j 条支路并网电流dq轴分量。

并网点电压的dq轴分量 v_{gd} 和 v_{gq} 可以表示为：

$$\begin{cases} v_{gd} = \frac{(\frac{v_{sd}}{L_s} + \sum_{j=1}^m \frac{v_{tdj}}{L_{gj}}) + \sum_{j=1}^m (\frac{r_{gj}}{L_{vj}} - \frac{r_s}{L_s}) i_{gdj}}{\frac{1}{L_s} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{L_{gj}}} \\ v_{gq} = \frac{(\frac{v_{sq}}{L_s} + \sum_{j=1}^m \frac{v_{tqj}}{L_{gj}}) + \sum_{j=1}^m (\frac{r_{gj}}{L_{vj}} - \frac{r_s}{L_s}) i_{gqj}}{\frac{1}{L_s} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{L_{gj}}} \end{cases} \quad (14)$$

式中： v_{tdj} 和 v_{tqj} 为第 j 条支路的滤波电容两端电压的dq分量； L_{gj} 和 r_{gj} 为第 j 条支路LCL滤波的网侧电感和网侧电阻。

该系统的状态量向量 $\mathbf{u}_{\text{SYS}}$ 可以表示为：

$$\mathbf{u}_{\text{SYS}} = [\mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 + \cdots + \mathbf{u}_m]^T \quad (15)$$

式中： $\mathbf{u}_0$ 为交流电网状态量； $\mathbf{u}_j$ 为第 j 的子系统的状态量。

3 基于LASSO回归的系统降维方法

本节具体介绍了LASSO回归进行降维分析流程，包括数据准备、回归模型构建、模型降维等。

3.1 数据准备

在应用LASSO回归进行模型降维分析前，需要

建立数据准备场景,通过改变系统参数或施加故障,进行不同运行场景下的状态量时间序列数据样本获取。同时,在回归分析模型的应用中,样本数 n 一般为状态量数 p 的5~10倍。需获取足够多的系统状态量时间序列样本,以保证状态量筛选准确性。

数据采集过程中,噪声干扰和通信异常等因素会引入误差,影响结果准确性。为减小此类影响,进行去噪、补全及异常数据处理。在数据缺失的情况下,可以删除包含缺失值的数据样本,或采用均值、中位数、众数进行填充;在数据异常的情况下,可以通过箱线图进行识别并处理异常值,避免其对正常数据样本产生干扰。

由于LASSO对特征尺度敏感,需要进一步对状态量进行标准化处理。

$$u'_j = \frac{u_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (16)$$

其中,

$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij} \quad (17)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{ij} - \mu_j)^2} \quad (18)$$

式中: u'_j 为第 j 个状态量进行了标准化处理; μ_j 为 u_j 状态量在 n 个样本中的均值; u_{ij} 为 u_j 状态量的第 i 个样本; σ_j 为 u_j 状态量的标准差。

标准化处理后,所有状态量的均值 μ'_j 为0,方差 σ'_j 为1。此时不同状态量的量纲保持一致,在LASSO回归中正则项的惩罚力度对所有系数公平。

3.2 回归模型构建

LASSO回归模型的构建包括两部分,观测向量 $\mathbf{Y}$ 和设计矩阵 $\mathbf{X}$ 。其中,观测向量常常是分类变量的合集,设计矩阵则是标准化后的状态量矩阵。观测向量 $\mathbf{Y}$ 中的数据需要根据模型需求进行提前处理,包括0/1编码的二分类处理或等级数值化的多分类处理等。

在系统稳定性判断中,本文通常选取若干状态量作为观测向量,用于判断系统是否稳定。而系统是否稳定和状态量之间的联系,可以构建出对应的函数关系 $\mathbf{Y}=\mathbf{f}(\mathbf{u}_k)$, $\mathbf{u}_k$ 为用于表征观测向量的状态量集。其余变量则作为状态量 $\mathbf{X}$ 。

此时,系统的回归模型建立完毕,可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \beta_0 + \beta_1 \mathbf{x}_1 + \beta_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + \beta_p \mathbf{x}_p + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{Y}$ 为系统的观测向量; β_0 为常数项; p 为状态量个数; β_j 为第 j 个状态量的系数; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为随机误差,误差项服从正态分布 $\boldsymbol{\varepsilon} \sim N(0, \sigma^2)$, σ^2 为误差项方差。

3.3 模型降维

根据所构建的模型,采用LASSO回归算法进行状态量筛选后,获得影响系统稳定的关键状态量。结合用于观测的状态量以及关键物理量,作为系统的保留状态量,进行状态量的降维处理。

在模型降维上,本文可以参考摄动法,保留所选状态量,将剔除的状态量动态特性作为系统的边界约束条件,从而达到降低模型维数的目标,其具体过程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{u}}_s \\ \xi \Delta \dot{\mathbf{u}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_s \\ \Delta \mathbf{u}_d \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 和 $\mathbf{u}_d$ 分别为保留状态量和剔除状态量; $\Delta \mathbf{u}_s$ 和 $\Delta \mathbf{u}_d$ 为状态量增量; $\Delta \dot{\mathbf{u}}_s$ 和 $\Delta \dot{\mathbf{u}}_d$ 为微分增量; $\mathbf{u}_s$ 、 $\mathbf{u}_d$ 共同构成系统的状态量; ξ 为摄动参数, $\mathbf{A}_{ij}$ ($i, j=1, 2$)为 $[\mathbf{A}]_{p \times p}$ 的二阶分块矩阵。摄动参数的选取原则为:

1)当描述一个物理过程时,可以选取时间常数作为摄动参数;

2)若不存在时间常数,则可以选取增加方程维数的寄生参数作为摄动参数,如电容、电感等;

3)对于控制方程,可以选取系统的反馈增益作为摄动参数。

将摄动参数 ξ 置0可得:

$$\Delta \mathbf{u}_d = -\mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21} \Delta \mathbf{u}_s \quad (21)$$

联立式(20),根据保留关键状态量的数量确定模型维数,降维方程如式(22)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{u}}_s = \mathbf{A}' \Delta \mathbf{u}_s \\ \mathbf{A}' = \mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21} \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\mathbf{A}'$ 为降维后的系数矩阵。

至此获得了系统的降维分析模型。

3.4 基于LASSO回归的系统降维总体流程

应用LASSO回归的降维方法,包括数据构建、模型构建、状态量筛选以及模型降维几个步骤,具体如图6所示。

步骤1:通过修改参数或施加故障,获取系统在不同场景下的状态量时间序列;

步骤2:对所获取的状态量时间序列进行数据预处理;

步骤3:构建观测向量和设计矩阵,构建

LASSO 回归模型，并进行状态量筛选；

步骤 4：保留筛选出的关键状态量、用于观测的状态量以及关键物理量，进行状态量降维处理。

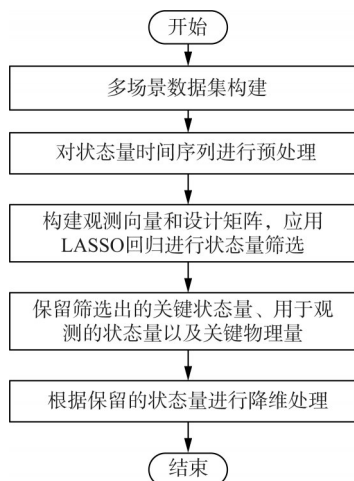


图 6 基于 LASSO 回归的系统降维总体流程

Fig. 6 Overall procedure of system dimensionality reduction based on LASSO regression

4 算例分析

本节于 PSCAD/EMTDC 中构建仿真模型获取仿真数据，通过算例验证，对 LASSO 回归算法的在电力系统状态量筛选的有效性进行验证。并在不同变流器系统上进行应用。最后，进行大扰动故障下的状态量筛选，分析所提方法在大扰动降维中的应用潜力。

4.1 LASSO 回归筛选状态量的有效性验证

构建一个多机风电场系统模型，应用 LASSO 回归算法进行状态量筛选，拓扑如图 7 所示。

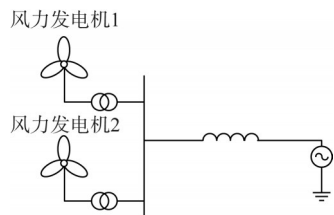


图 7 多机风电场拓扑

Fig. 7 Topology of multi-turbine wind farms

在多机风电场下，选取不同风机出口的电压、电流、有功功率、无功功率作为状态量。设置并网母线发生不同跌落深度的三相接地故障，持续时间为 0.5 s。通过记录状态量的时间序列的有效值，作为状态量筛选数据集。

将系统失稳时的观测向量 $\mathbf{Y}$ 的值设置为 1，稳定时

的观测向量 $\mathbf{Y}$ 的值设为 0。进行 LASSO 回归分析，得到 LASSO 回归状态量筛选路径图，具体如图 8 所示。

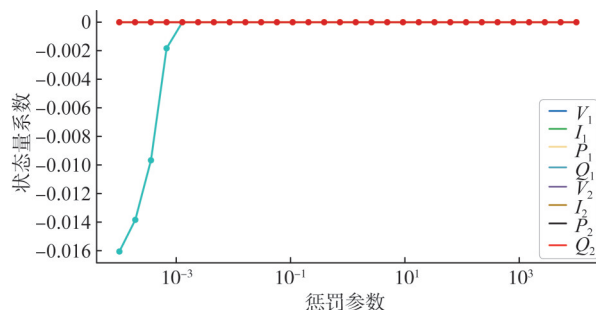


图 8 多机风电场 LASSO 回归路径

Fig. 8 LASSO regression path for multi-turbine wind farms

图 8 中，当惩罚参数 λ 小于 10^{-3} 时，所保留状态量为 1 号风机出口的无功功率。由于和一号风机的响应特性完全相同，2 号风机出口的无功功率在 LASSO 回归分析中被剔除。

在风电场的等值分析中，一般认为所有的风电机组具有相同的动态特性，因此可以采用单机倍乘的方式进行等值。应用 LASSO 回归进行多机系统状态量筛选时，仅选取了单台风电机组的状态量作为识别失稳与否的关键状态量。这和单机倍乘的等值思路具有一致性，证明了 LASSO 回归在面临多机状态量筛选时的有效性。

4.2 跟网变流器系统降维分析

针对图 1 所示的变流器系统，应用基于 LASSO 回归的降维分析方法。在该系统中，电网等效电感 L_s 是影响系统稳定性的关键参数。其数值增大会导致电网强度减弱，进而影响变流器的稳定运行。因此，选取 L_s 作为控制电网连接强度的参数，进行数据集的构建。设置 L_s 参数在区间 $[5, 13.5]$ mH 范围内变化，记录其中状态量的时间序列。

本文在系统稳定性判断时，依据行业标准以及工程经验，设置直流侧电压阈值为电压参考值的 90 %~110 %。若系统最终电压不在阈值范围内，则判断为失稳；反之，则认为系统稳定。将失稳的情况记录为 1，稳定的情况记录为 0，作为 LASSO 回归观测向量 $\mathbf{Y}$ 的取值。

以状态量 v_{dc} 作为观测向量，其余状态量作为待筛选状态量，通过 LASSO 回归处理筛选出影响系统稳定性的关键状态量。图 9 展示了跟网型变流器系统的 LASSO 回归状态量筛选路径。

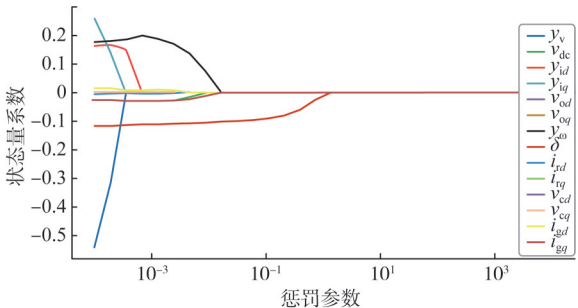


图 9 跟网变流器系统 LASSO 回归路径

Fig. 9 LASSO regression path for grid-following converter system

根据 LASSO 回归结果, 选出 y_v 、 y_{id} 、 y_{iq} 、 y_ω 、 δ 、 i_{gd} 、 i_{gq} 等 7 个状态量, 作为系统的关键状态量。同时保留用于预测向量的状态量 v_{dc} , 得到系统保留状态量 $\mathbf{u}_{sGFL}=[y_v, y_{id}, y_{iq}, y_\omega, \delta, i_{gd}, i_{gq}, v_{dc}]^T$ 。

进一步的, 对保留状态量进行降维处理, 得到变流器系统的 8 阶降维系统。同原系统进行特征值分布对比, 具体如图 10 所示。降维前后系统的特征值大小, 数值详见表 1。

观察发现, 降维前后系统的主导特征值高度吻合。仅特征值 $\lambda_{7,8}$ 存在较大差异, 由于这对特征值远离虚轴, 不影响系统稳定分析。因此认为降维系统能够反映原系统的主导特征。

接下来进行 PSCAD/EMTDC 数值仿真验证, 调节 L_s 参数大小, 仿真结果如图 11 所示。系统在 $L_s=8.5$ mH 时系统稳定, $L_s=9$ mH 时出现等幅振荡, $L_s=9.5$ mH 时系统失稳。

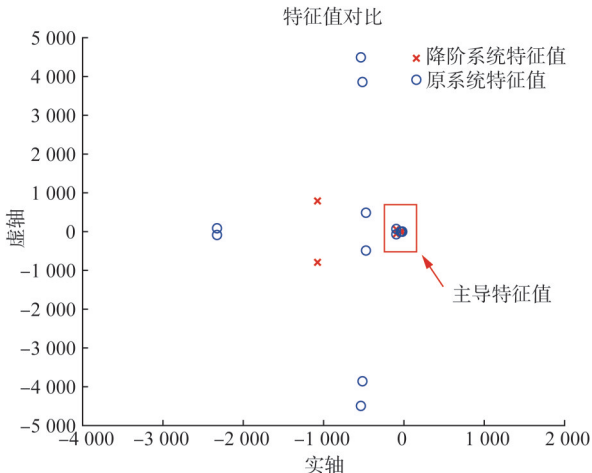
观察特征值轨迹图 12, $L_s=8.5$ mH 时特征值均处于左半平面; $L_s=9$ mH 时一对共轭特征值正在虚轴附近; $L_s=9.5$ mH 时这对共轭特征值穿过虚轴进入右半平面, 系统发散振荡失稳。

详细模型仿真结果与降维模型特征值轨迹理论分析一致, 验证了降维模型的正确性, 同时说明降维模型可以用于稳定性分析。

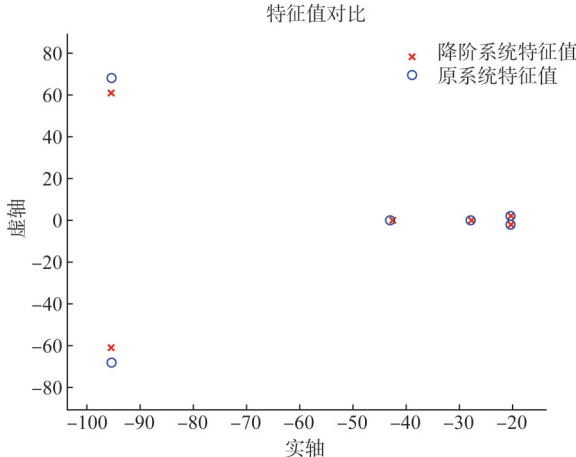
4.3 构网变流器系统降维分析

针对图 3 所示的 VF 下垂控制构网变流器系统, 应用基于 LASSO 回归的降维分析方法。

在构网系统中, 构网变流器同交流电源的电气距离越近, 系统越容易失稳^[34]。选取 L_s 作为改变电网连接强度的参数, 进行数据集的构建。设置 L_s 参数在区间 $[0.2, 3]$ mH 范围内变化, 记录其中状态量的时间序列。选择变流器输出电压 v_{td} 作为观测



(a) 特征值分布对比



(b) 局部放大对比

图 10 跟网变流器特征值分布对比图

Fig. 10 Comparative eigenvalue distribution plot of grid-following converter

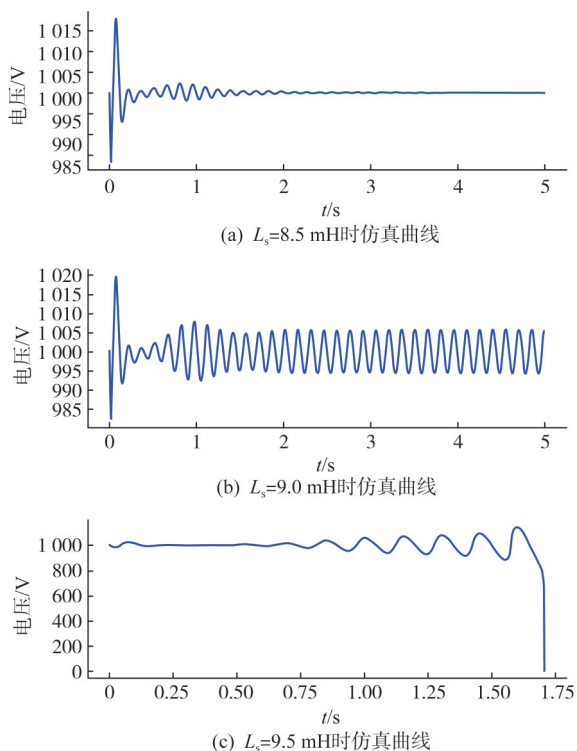
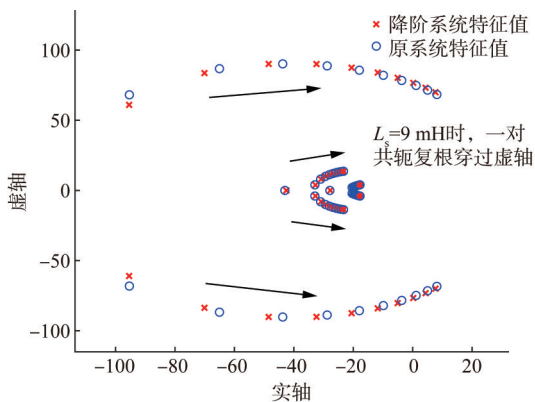
表 1 跟网变流器系统降维前后特征值

Tab. 1 Eigenvalue comparison before and after grid-following converter system dimensionality reduction

原系统		降维系统	
特征值	数值	特征值	数值
$\lambda_{1,2}$	$-20.4 \pm j2.1$	$\lambda_{1,2}$	$-20.2 \pm j2.1$
λ_3	-27.9	λ_3	-27.9
λ_4	-43.0	λ_4	-43.8
$\lambda_{5,6}$	$-95.4 \pm j68.1$	$\lambda_{5,6}$	$-94.5 \pm j61.0$
$\lambda_{7,8}$	$-472.9 \pm j487.3$	$\lambda_{7,8}$	$-1\,075.6 \pm j791.5$
$\lambda_{9,10}$	$-516.4 \pm j3\,858.3$		
$\lambda_{11,12}$	$-536.0 \pm j4\,494.0$		
$\lambda_{13,14}$	$-2\,326.8 \pm j86.7$		

量, 其余状态量作为待筛选状态量。图 13 展示了构网变流器系统的 LASSO 回归状态量筛选路径。

根据 LASSO 回归结果, 选出 δ 、 P 、 Q 、 i_{td} 、

图 11 不同 L_s 下直流电压Fig. 11 v_{dc} at different L_s 图 12 跟网变流器不同 L_s 下特征值轨迹图Fig. 12 Eigenvalue trajectory maps under different L_s of grid-following converter

i_{rq} 、 y_{vd} 、 y_{vq} 、 y_{id} 、 y_{iq} 等 9 个状态量, 作为系统的关键状态量。得到系统保留状态量 $\mathbf{u}_{sGFM} = [\delta, P, Q, i_{rd}, i_{rq}, y_{vd}, y_{vq}, y_{id}, y_{iq}]^T$ 。

对保留状态量进行降维处理, 对比原系统的特征值分布情况, 具体如图 14 所示。可以看到, 系统主导特征值同原系统保持一致。图 15 展示了构网变流器的特征值运动轨迹, 通过逐步减小 L_s , 在减小到 1.6 mH 时系统发生失稳现象, 降维前后系统特征值运动规律一致。

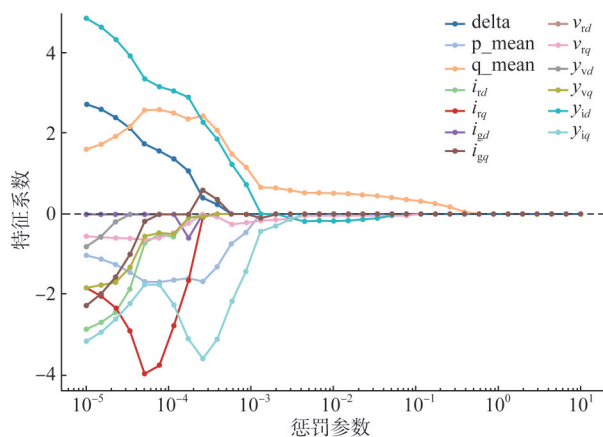


图 13 构网变流器系统 LASSO 回归路径

Fig. 13 LASSO regression path for grid-forming converter system

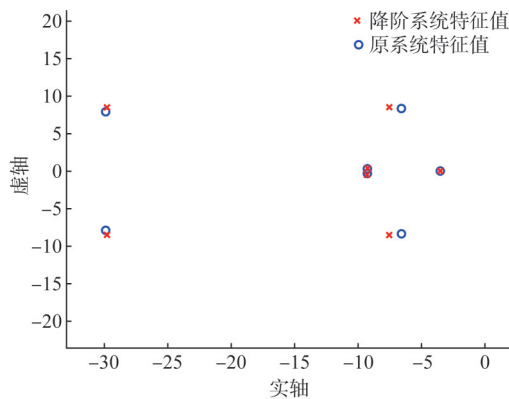
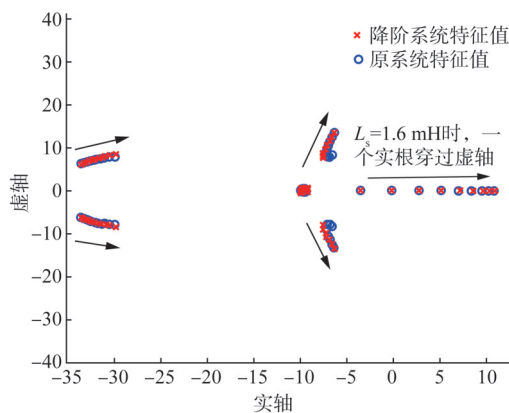


图 14 构网变流器特征值分布对比图

Fig. 14 Comparative eigenvalues distribution plot of grid-forming converter

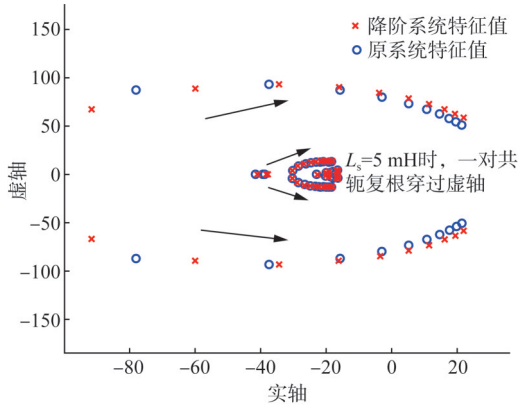


L_s 在 $[0.2, 2]$ mH 的范围内变化, 对比主导特征值运动轨迹。

图 15 构网变流器不同 L_s 下特征值轨迹图Fig. 15 Eigenvalue trajectory maps under different L_s of grid-forming converter

需指出, 构网型变流器的下垂控制系数 m_p 和 n_q 的大小直接影响系统稳定性。通过实验设置, 令 m_p

Fig. 19 Comparative eigenvalue distribution plot of multiple converters

图 20 多变流器不同 L_s 下特征值轨迹图Fig. 20 Eigenvalue trajectory maps under different L_s of multiple converters

致,证明了所提方法在多变流器系统中的有效性。

4.5 大扰动下状态量筛选分析

前文的仿真实验证明了所提方法在小扰动场景下的有效性。本文所提方法基于数据驱动获取系统的完整非线性动态响应,状态量筛选方法能够识别系统关键特征,存在大扰动降维的应用潜力,进一步设置实验验证。

直流卸荷保护(chopper)电路为附加控制结构,能够在暂态下限制直流母线过电压,以实现故障穿越^[35]。在图 21 所示的直驱风机并网模型中,对 PCC 点设置故障时长为 $[0.05, 0.5]$ s、故障电压跌落至 $[0.2, 0.8]$ p. u. 的感性三相短路接地故障,对比有无 chopper 电路情况下的直流电压稳定情况。建立 LASSO 回归数据集。

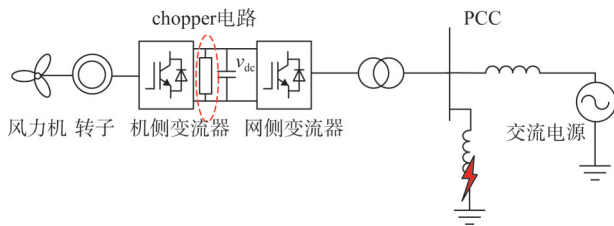


图 21 风机并网模型

Fig. 21 Grid-connected model of wind turbine

选取 v_{dc} 作为观测向量,网侧变流器输出电压、电流 i_d 、 i_q 、 v_d 、 v_q 、控制环节电压、电流参考值 i_{dref} 、 i_{qref} 、 v_{dref} 、 v_{qref} 、系统频率相角 ω 、 δ 及 chopper 是否投入 $chop$ (chopper 投入时 $chop=1$, 未投入时 $chop=0$) 为待筛选量。待筛选状态量集 $u=[i_d, i_q, v_d, v_q, i_{dref}, i_{qref}, v_{dref}, v_{qref}, \omega, \delta, chop, v_{dc}]^T$ 共有 12 个状态量。图 22 展示了考虑 chopper 电路的风机

并网系统的 LASSO 回归状态量筛选路径。

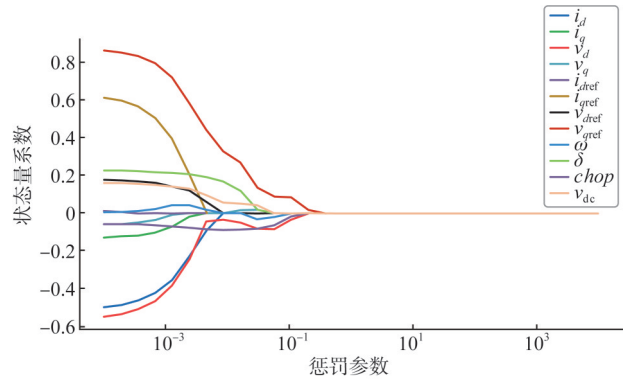


图 22 风机并网系统 LASSO 回归路径

Fig. 22 LASSO regression path for wind turbine system

根据 LASSO 回归结果,选出 v_d 、 v_q 、 v_{dref} 、 v_{qref} 、 δ 、 $chop$ 、 v_{dc} 等 7 个变量。chopper 电路是否投入对系统暂态稳定性影响显著^[36],所提方法将 chopper 电路投入状态筛选为系统稳定性分析的重要因素,符合大扰动下附加控制能够增加系统稳定性的基本认识^[37]。这说明了所提方法在大扰动降维分析存在应用潜力。未来将进一步研究基于所筛选状态量的大扰动场景仿真分析。

5 结论

为了更准确地识别影响系统稳定性的关键状态量,本文提出了一种基于 LASSO 回归的变流器并网系统降维分析方法。主要有以下特点:1)针对原始系统,利用数据驱动的方式获取完整动态特性,从而进行状态量选取,避免了现有摄动法状态量选取基于线性化模型的限制性;2)利用 LASSO 回归获取关键状态量,并基于物理认识补充重要状态量,保证状态量选取的准确可靠。

本文以变流器并网系统为例,分别在跟网变流器系统、构网变流器系统以及多变流器系统进行仿真验证,通过本文方法进行降维,模型阶数降至原系统的 70% 以下,降维模型与详细模型主导特征值的运动轨迹高度吻合,证明降维模型可以很好地表征详细模型的主导动态特性。时域仿真结果同特征值分析一致,表明通过筛选出关键状态量实现降维分析的方法是可行的。

本文以典型的变流器为对象,验证了所提方法在小扰动稳定分析中的有效性。本文提出的“数据驱动筛选状态量+物理知识补充”的状态量筛选整体

框架,针对所选状态量可采用不同降维方法实现降维,形成不同的降维模型。下一步将把所提状态量筛选框架拓展至不同系统与各类降维方法,并将该方法应用于大扰动场景下的降维仿真分析中。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [3] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [4] 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等.信息电力与FACTS及DFACTS技术[J].电力系统自动化,2000,24(19):1-7,20.
HAN Yingduo, YAN Gangui, JIANG Qirong, et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(19): 1-7,20.
- [5] 韩民晓,肖湘宁,徐永海.柔性化供电技术[J].电力系统自动化,2002,26(8):1-5,50.
HAN Minxiao, XIAO Xiangning, XU Yonghai. Flexible electric energy delivery feed technique [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 1-5,50.
- [6] 栗峰,丁杰,周才期,等.新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J].电网技术,2024,48(1):184-199.
LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 184-199.
- [7] 杨龙月,任烜辰,蔡智鹏,等.高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J].电网技术,2024,48(12):5056-5070.
YANG Longyue, REN Xuanchen, CAI Zhipeng, et al. Review on voltage control strategies for high PV penetration distribution networks [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5056-5070.
- [8] 韩磊,胥国毅,王程,等.新能源电力系统调频资源与频率时空动态关联分析及分布表征[J].中国电机工程学报,2025,45(13):5106-5119.
HAN Lei, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Correlation analysis and distribution characterization of frequency regulation resources and frequency spatiotemporal dynamics in renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(13): 5106-5119.
- [9] DU W, WANG Y, WANG H, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1563-1582.
- [10] HU W, WU Z, DINAVAH V. Dynamic analysis and model order reduction of virtual synchronous machine based microgrid [J]. IEEE Access, 2020(8): 106585-106600.
- [11] 田艳军,王学成,李兆杰,等.模块化多电平换流器宽范围能量线性化和模型降阶的全状态反馈控制[J].中国电机工程学报,2025,45(23):9392-9405.
TIAN Yanjun, WANG Xuecheng, LI Zhaojie, et al. Full state feedback control for modular multilevel converter with wide-range energy linearization and reduced system type [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9392-9405.
- [12] 苏晨博,刘崇茹,李志显,等.基于阻抗法的大规模风电场等值方法研究[J].电测与仪表,2022,59(6):90-97.
SU Chenbo, LIU Chongru, LI Zhixian, et al. Research on equivalent method of large-scale wind farm based on impedance method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 90-97.
- [13] 张昌华,陈泽兆,袁宸悦,等.基于奇异摄动和平衡实现理论的小信号模型混合降阶方法[J/OL].电网技术,1-12[2025-07-23].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0708>.
ZHANG Changhua, CHEN Zezhao, YUAN Chenyue, et al. A hybrid order reduction method of small signal model based on singular perturbation and balanced realization [J/OL]. Power System Technology, 1-12[2025-07-23]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0708>.
- [14] 马凡,马伟明,付立军,等.一种多时间尺度降阶原则及其在交直流电力系统中的应用[J].中国电机工程学报,2009,29(13):41-47.
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun, et al. A multi-time scale order reduction principle and its application in AC/DC power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 41-47.
- [15] 高本锋,王刚,邵冰冰,等.基于主导度分析的直驱风电场奇异摄动降阶方法[J].中国电机工程学报,2022,42(7):2449-2462.
GAO Benfeng, WANG Gang, SHAO Bingbing, et al. The singular perturbation approximation method based on the dominant degree analysis for direct drive wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2449-2462.
- [16] 于潇寒,王睿,邹亮,等.基于平衡截断的锁相环完整结构保留双馈风电机组降阶模型构建[J].电工技术学报,2026,41(3):898-911.
YU Xiaohan, WANG Rui, ZOU Liang, et al. Construction of reduced order model of doubly-fed wind turbines with the preservation of complete phase-locked loop structure based on balanced truncation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(3): 898-911.
- [17] LYONS B, O'DWYER E, SHAH N. Model reduction for Model Predictive Control of district and communal heating systems within cooperative energy systems [J]. Energy, 2020(197), 117178.
- [18] MAHTAB U, MONIR M U, HAKIM A M K. SVD-Krylov-based sparsity-preserving techniques to optimally stabilize the incompressible Navier-Stokes flows [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2023, 11(6): 2763-2773.
- [19] SUBROTO R K, CHEN YC, LIAN K L, et al. An accurate accelerated steady state model for high-level modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,

- 2021, 57(4): 4278 – 4293.
- [20] 王青于, 楚智霖, 程建伟, 等. 换流变阀侧套管极性反转暂态电场模型降阶[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2420 – 2431.
- WANG Qingyu, CHU Zhilin, CHENG Jianwei, et al. Reduced order model of polarity reversal transient electric field of converter transformer valve-side bushing [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2420 – 2431.
- [21] WANG L, DONG X, JING L, et al. Research on digital twin modeling method of transformer temperature field based on POD[J]. Energy Reports, 2023, 9(S2): 299 – 307.
- [22] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the LASSO[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 1996, 58(1): 267 – 288.
- [23] 唐澄淇, 董树锋, 朱承治, 等. 基于 Tri-Training-LASSO-BP 网络的静态电压稳定裕度在线预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3824 – 3835.
- TANG Yingqi, DONG Shufeng, ZHU Chengzhi, et al. Online prediction method of static voltage stability margin based on Tri-Training-LASSO-BP network [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3824 – 3835.
- [24] MO W, LV J, PAWLAK M, et al. Power system oscillation mode prediction based on the lasso method[J]. IEEE Access, 2020(8): 101068 – 101078.
- [25] LAN J, ZHOU Y, GUO Q, et al. Data augmentation for data-driven methods in power system operation: a novel framework using improved GAN and transfer learning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(5): 6399 – 6411.
- [26] ZHAO Y, ZHAO Y, LIAO H, et al. Interpreting LASSO regression model by feature space matching analysis for spatio-temporal correlation based wind power forecasting[J]. Applied Energy, 2025(380): 124954.
- [27] EFRON B, HASTIE T, JOHNSTONE I. Least angle regression [J]. Annals of Statistics, 2004, 32(2): 407 – 451.
- [28] 陈善雄, 刘小娟, 陈春蓉, 等. 针对 Lasso 问题的多维权重求解算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(6): 1674 – 1679.
- CHEN Shanxiong, LIU Xiaojuan, CHEN Chunrong, et al. Method for solving Lasso problem by utilizing multi-dimensional weight [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(6): 1674 – 1679.
- [29] 曾津, 周建军. 高维数据变量选择方法综述[J]. 数理统计与管理, 2017, 36(4): 678 – 692.
- ZENG Jin, ZHOU Jianjun. Variable selection for high-dimensional data model: a survey [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2017, 36(4): 678 – 692.
- [30] YANG J, TSE C, HHUANG M, et al. Bifurcations of grid-following rectifiers and routes to voltage instability in weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1702 – 1713.
- [31] 罗海宁, 刘航, 刘飞, 等. 基于下垂与 VSG 控制的多变流器混联系统无功功率分配策略[J/OL]. 南方电网技术, 1 – 15 [2026 – 01 – 06]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260105.1726.022>.
- LUO Haining, LIU Hang, LIU Fei, et al. Reactive power distribution strategy for multi-converter hybrid-connected systems based on droop and VSG control [J/OL]. Southern Power System Technology, 1 – 15 [2026 – 01 – 06]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260105.1726.022>.
- [32] 张兆洋, 高丙团, 索之闻, 等. 柔性直流输电系统支撑新能源送端频率稳定的自适应双下垂控制策略[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 1 – 11.
- ZHANG Zhaoyang, GAO Bingtuan, SUO Zhiwen, et al. Adaptive dual droop control strategy of VSC-HVDC for supporting frequency stability of sending-end system with renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 1 – 11.
- [33] 胡雪凯, 孟良, 李磊, 等. 基于有源谐波电阻控制的下垂控制变流器振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2025, 58(9): 44 – 53, 67.
- HU Xuekai, MENG Liang, LI Lei, et al. Oscillation suppression strategy for droop control converter based on active harmonic resistance control[J]. Electric Power, 2025, 58(9): 44 – 53, 67.
- [34] GAO X, ZHOU D, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space modelling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 4910 – 4920.
- [35] 郑子萱, 宋东徽, 谢琦, 等. 考虑撬棒与直流卸荷协同保护动作特性的双馈风电场通用等值建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6023 – 6035.
- ZHENG Zixuan, SONG Donghui, XIE Qi, et al. A general equivalent modeling method for DFIG wind farms considering the coordinated action characteristics of crowbar and chopper protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6023 – 6035.
- [36] NASIRI M, ARZANI A. Robust control scheme for the braking chopper of PMSG-based wind turbines-A comparative assessment [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(134): 107322.
- [37] 路焱, 宋晓辉, 盛万兴, 等. 计及低电压穿越过程电流动态的新能源并网系统暂态同步稳定分析方法和控制策略[J]. 电网技术, 2025, 49(11): 4556 – 4567.
- LU Yan, SONG Xiaohui, SHENG Wanxing, et al. Analysis method and control strategy for transient synchronous stability of grid-connected new energy resources system considering current dynamics during LVRT [J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4556 – 4567.

收稿日期: 2025-08-31; 网络首发日期: 2026-04-02

作者简介:

刘崇茹(1977), 女, 教授, 博士, 研究方向为交直流混合系统分析与仿真、运行与控制, chongru.liu@ncepu.edu.cn;

吕懿澎(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与模型降阶, lyyipeng2000@ncepu.edu.cn;

苏晨博(1991), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为风力发电机电系统及其控制、柔性直流输电系统及其控制, scb2636@foxmail.com。