DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.98 中图分类号：TM74 文献标志码：A

基于数据驱动子空间的光伏并网发电系统孤岛检测方法

陈恩怜[1]，陈建民[2]，张依恋[1]，范勤勤[3]
(1.上海海事大学航运技术与控制工程交通运输行业重点实验室，上海 201306；2.中国舰船研究设计中心，武汉 430060；3.上海海事大学物流研究中心，上海 201306)

摘要：近年来，光伏并网发电技术迅速发展，随之也带来了孤岛效应等威胁。实现对孤岛效应的实时监测对于保障光伏发电系统运行的稳定性具有重要意义。因此，针对光伏并网发电系统孤岛故障，提出了1种基于数据驱动子空间的孤岛检测方案。首先，以公共耦合节点处电压基波与电压的2次谐波信号作为检测孤岛的依据，设计基于子空间辨识方法的电压基波输出预测器；然后设计孤岛检测自适应滤波器实时跟踪电压基波信号并放大电压基波信号生成残差信号，进而根据残差信号和电压2次谐波信号设计孤岛故障检测器，判断系统是否遭受孤岛故障；最后通过仿真实验验证所提方法的有效性。

关键词：孤岛检测；数据驱动；子空间辨识；光伏并网发电系统

Data-driven Subspace-based Islanding Detection Method for Grid-connected Photovoltaic Power Generation System

CHEN Enlian[1], CHEN Jianmin[2], ZHANG Yilian[1], FAN Qinqin[3]
(1. Key Laboratory of Transport Industry of Marine Technology and Control Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430060, China; 3. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The grid-connected photovoltaic power generation technology has developed quickly in recent years, but it also poses risks such as the islanding effect. The realization of real-time monitoring of islanding effect is of significance for ensuring the stable operation of photovoltaic power generation systems. Therefore, aimed at the islanding fault of grid-connected photovoltaic power generation systems, a data-driven subspace-based islanding detection scheme is proposed. First, the fundamental wave from the voltage signal and the secondary harmonic signal of voltage at the point of common coupling are taken as the basis for islanding detection, and a voltage fundamental wave output predictor based on the subspace identification approach is designed. An adaptive filter for islanding detection is designed to track the fundamental wave from the voltage signal in real time, and the fundamental wave from the voltage signal is amplified to generate a residual signal. On this basis, an islanding fault detector is designed according to the residual signal and the secondary harmonic signal of voltage, so as to judge whether the system suffers the islanding fault. Finally, the effectiveness of the proposed approach was verified by simulation results.

Keywords: Islanding detection; data-driven; subspace identification; grid-connected photovoltaic power generation system

收稿日期：2023-10-13；**修回日期：**2023-12-25，2024-02-06，2024-03-03；**录用日期：**2024-03-09；**网络首发日期：**2024-05-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62176150)；上海市高校能力建设资助项目(20040501400)；上海市浦江人才计划资助项目(22PJD030)
This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under the grant 62176150; the Shanghai University Capacity Building Project under the grant 20040501400; the Shanghai Pujiang Talent Program under the grant 22PJD030

近年来，由于绿色发展的需要，光伏发电技术得到了更加广泛的应用[1-2]。与此同时，光伏发电系统的故障检测问题引发大量关注。光伏发电系统

需要与主电网连接进行电能传输，但是易受自然或者人类活动影响，发生电网电力不存在而光伏发电系统继续为用户供电的情况[3-4]，即孤岛故障问题。孤岛故障可能会造成电气设备的损坏，甚至伤害人身安全，因此成为了光伏系统故障研究领域关注的焦点[5-6]。

由于光伏并网发电系统的动态特性往往表现在输出、输入数据的变化之中，因此，通过分析在线监测系统获得的大量运行数据，有望实现对设备状态的实时评估及对孤岛故障的实时检测。基于运行数据进行系统分析的方法主要有基于模型分析[7-8]及基于数据驱动分析[9-10]2 大类。随着电网规模的不断扩大，以及可再生能源并网的大规模应用，数据驱动的方法被广泛应用于电力系统中[11-15]。数据驱动主要有主成分分析法、偏最小二乘法、子空间辨识法等。其中，子空间辨识法是利用输入、输出数据得到系统的空间状态模型，通过空间状态模型得到的预测值与实际值生成残差空间向量，对系统进行诊断，具有数值鲁棒性高、运算速度快、无需模型参数化等诸多优势[16-18]。

目前，孤岛检测主要可分成本地检测与远程检测 2 种，本地检测作为研究的热点主要分为主动式与被动式，两者的区别在于是否向系统主动注入干扰。对于孤岛故障的研究多是基于电流或者电压的相位、频率、幅值等单一指标来进行，如文献[19-22]是对基波电压进行监测和处理，实现对孤岛的检测。但是当本地负载与主电网发生谐振时，孤岛故障前、后电流与电压均不会发生明显变化，这就可能造成孤岛检测存在盲区。而电压的各次谐波在谐振负载孤岛故障前、后均会发生明显变化，因此电压的各次谐波也逐步成为孤岛检测的重要数据量[23-25]。与此同时，由于测量时不可避免地会引入测量干扰导致电网的不确定性提高，因此在不主动引入干扰的情况下考虑电网不确定性，设计利用电压基波与电压 2 次谐波的孤岛检测方法具有重要的研究意义。

1　光伏并网发电系统孤岛检测问题

光伏并网发电系统如图 1 所示，该系统由分布式直流电源，逆变器，滤波器，主电网 U_{g}，本地负载 R、L、C，单相四桥电压源逆变器，正弦脉冲宽度调制 SPWM (sinusoidal pulse width modulation)发生器等构成。当电网受到干扰或者发生故障时，电网的保护机制使得配电线断开，本地负载与光伏发电系统构成用电孤岛，脱离主电网约束，导致孤岛故障产生。

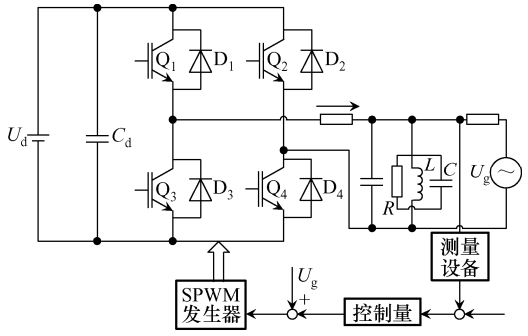


图 1　太阳能光伏并网系统示意

Fig. 1 Schematic of solar photovoltaic power grid-connected system

注意到在孤岛故障发生的情况下，电流与电压变化可能并不明显，故常规采用单一的电流与电压检测孤岛的方式存在一定的局限，而公共连接点 PCC(point of common coupling)处电压的 2 次谐波在孤岛前、后会发生明显变化，因此本文利用孤岛前、后的电压基波与电压 2 次谐波值变化进行孤岛检测方法设计。假设输入电压基波数据为 x，输出电压基波数据为 y，预测时间域为 m，根据系统在 $\{0,1,\cdots,2m-1\}$ 时刻的输入数据 $\{x_0,x_1,\cdots,x_{2m-1}\}$ 和 $\{0,1,\cdots,m-1\}$ 时刻的输出数据 $\{y_0,y_1,\cdots,y_{m-1}\}$，对 $\{m,m+1,\cdots,2m-1\}$ 时刻的输出进行预测，设计电压基波输出预测器为

$$\hat{\boldsymbol{y}}(m)=\boldsymbol{L}_x\times\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)+\boldsymbol{L}_w\times\boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m) \tag{1}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{y}}(m)\triangleq[\hat{\boldsymbol{y}}_m\ \ \hat{\boldsymbol{y}}_{m+1}\cdots\hat{\boldsymbol{y}}_{2m-1}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{L}_x$、$\boldsymbol{L}_w$ 均为待确定的参数矩阵；$\boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)$ 和 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)$ 分别为系统所获取的过去的数据及未来输入的数据，$\boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}(m)\\ \boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_m\\ \boldsymbol{x}_{m+1}\\ \vdots\\ \boldsymbol{x}_{m+i-1}\end{bmatrix}$，其中，$\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}(m)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{m-i}\\ \boldsymbol{x}_{m-i+1}\\ \vdots\\ \boldsymbol{x}_{m-1}\end{bmatrix}$，

$\boldsymbol{y}_{\mathrm{p}}(m)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}_{m-i}\\ \boldsymbol{y}_{m-i+1}\\ \vdots\\ \boldsymbol{y}_{m-1}\end{bmatrix}$；下标 f 表示未来时刻，下标 p 表过去时刻。在理想情况下，输出基波电压预测值与标称过程运行状态下的基波电压测量值完全相同，因此可以通过监测实际基波电压测量值与基波电压预测值之间的差异检测故障是否发生。假设孤岛故障存在时的系统输出描述为

$$\boldsymbol{y}(m)=[\boldsymbol{L}_x \quad \boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\cdot\boldsymbol{f}(m) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{y}(m)\triangleq[\boldsymbol{y}_m \ \ \boldsymbol{y}_{m+1} \ \cdots \ \boldsymbol{y}_{2m-1}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}$ 为故障转移矩阵；$\boldsymbol{f}(m)$为孤岛故障。考虑到实际光伏并网发电系统的输出电压基波数据往往容易受到外界扰动等不确定性影响，因此实际系统输出电压基波可以进一步写为

$$\boldsymbol{y}(m)=[\boldsymbol{L}_x+\Delta\boldsymbol{L}_x \quad \boldsymbol{L}_w+\Delta\boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\times\boldsymbol{f}(m) \tag{3}$$

式中，$\Delta\boldsymbol{L}_x$、$\Delta\boldsymbol{L}_w$分别为相对于参数矩阵 $\boldsymbol{L}_x$、$\boldsymbol{L}_w$ 标称值的增量。

因此，可得到系统的预测误差 $\boldsymbol{e}(m)\triangleq[\boldsymbol{e}_m \ \boldsymbol{e}_{m+1}\cdots\boldsymbol{e}_{m+i-1}]^{\mathrm{T}}$ 为

$$\boldsymbol{e}(m)=\boldsymbol{y}(m)-\hat{\boldsymbol{y}}(m)=\boldsymbol{y}(m)-[\boldsymbol{L}_x \quad \boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}=[\Delta\boldsymbol{L}_x \quad \Delta\boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}(m) \tag{4}$$

此时的误差 $\boldsymbol{e}(m)$ 由系统不确定性输出与孤岛故障输出共同构成，故应将系统不确定性输出排除后，再进行孤岛诊断。

为检测孤岛故障，设计孤岛检测自适应滤波器用于生成残差信号 $\boldsymbol{r}(m)$，其表达式为

$$\boldsymbol{r}(m)=\boldsymbol{F}\times[\boldsymbol{y}(m)-\hat{\boldsymbol{y}}(m)]=\boldsymbol{F}\left[\Delta\boldsymbol{L}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\times\boldsymbol{f}(m)\right] \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为需确定的滤波增益；$\Delta\boldsymbol{L}=[\Delta\boldsymbol{L}_x \quad \Delta\boldsymbol{L}_w]$。理想情况下，$\boldsymbol{F}$ 可以根据 $\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}=0$ 和 $\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\neq 0$ 进行确定；在实际情况下，其确定方法为

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}\rightarrow\min\\ \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\rightarrow\max\end{cases} \tag{6}$$

因此，本文将根据式(6)设计孤岛检测自适应滤波器，用以消除不确定性对测量数据的影响。

2 基于子空间辨识的孤岛检测方案

设计如图 2 所示的光伏发电系统故障检测方案，主要包含以下 3 个步骤。

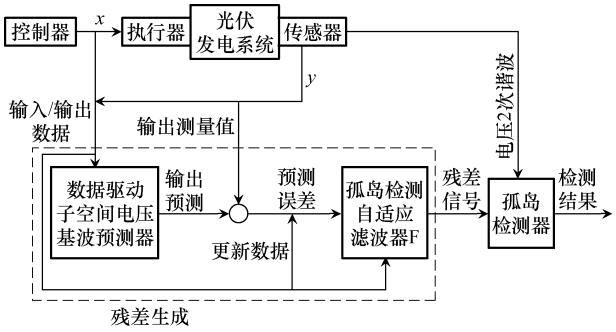


图 2 基于子空间辨识的孤岛检测方案示意

Fig. 2 Schematic of islanding detection scheme based on subspace identification

(1)设计电压基波输出预测器：利用离线输入、输出数据，根据子空间辨识方法确定电压输出预测器参数。

(2)设计孤岛检测自适应滤波器：设计孤岛检测自适应滤波器以消除系统不确定性影响，获取残差信号。

(3)孤岛检测器：设定孤岛阈值，基于孤岛检测自适应滤波器输出的残差信号与电压 2 次谐波设计孤岛检测器，生成孤岛指示信号，判断孤岛故障是否发生。

2.1 电压基波输出预测器设计

为了能够捕捉孤岛发生前、后电压基波的变化，得到预测误差 $\boldsymbol{e}(m)$ 作为自适应滤波器的输入，设计了电压基波输出预测器。电压基波输出预测器的设计主要根据离线输入、输出数据确定参数 $\boldsymbol{L}_x$ 和 $\boldsymbol{L}_w$。假设已知正常运行条件下所获取的 1 组输入、输出数据分别为$\{x_0,\ x_1,\cdots,\ x_{n-1}\}$及$\{y_0,\ y_1,\cdots,\ y_{n-1}\}$，选取其中 0~2$m$−1 的输入数据$[\boldsymbol{x}_0 \ \boldsymbol{x}_1\cdots\boldsymbol{x}_{2m-1}]^{\mathrm{T}}$

和 0~m−1 的输出数据$[\boldsymbol{y}_0\ \boldsymbol{y}_1\cdots\boldsymbol{y}_{m-1}]^{\mathrm{T}}$用于预测输出$[\boldsymbol{y}_m\ \ \boldsymbol{y}_{m+1}\cdots\boldsymbol{y}_{2m-1}]^{\mathrm{T}}$的值。通过滑动预测时间窗口，根据 1~2$m$时刻的输入数据$[\boldsymbol{x}_1\ \boldsymbol{x}_2\cdots\boldsymbol{x}_{2m}]^{\mathrm{T}}$及 1~$m$时刻的输出数据$[\boldsymbol{y}_1\ \boldsymbol{y}_2\cdots\boldsymbol{y}_m]^{\mathrm{T}}$预测 m~2m 的输出$[\boldsymbol{y}_{m+1}\ \ \boldsymbol{y}_{m+2}\cdots\boldsymbol{y}_{2m}]^{\mathrm{T}}$，预测输出定义为$[\hat{\boldsymbol{y}}_{m+1}\ \hat{\boldsymbol{y}}_{m+2}\cdots\hat{\boldsymbol{y}}_{2m}]^{\mathrm{T}}$。因此，可将原长度为 n 的输入、输出预测问题转化为 M(M=n−2m+1)窗口的预测问题。

根据式(5)可以得到，预测误差矩阵 $\boldsymbol{E}$ 为

$$\boldsymbol{E}\triangleq\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}-[\boldsymbol{L}_x\quad\boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}\tag{7}$$

式中：

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}_m & \boldsymbol{y}_{m+1} & \cdots & \boldsymbol{y}_{m+M-1}\\ \boldsymbol{y}_{m+1} & \boldsymbol{y}_{m+2} & \cdots & \boldsymbol{y}_{m+M}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{y}_{2m-1} & \boldsymbol{y}_{2m} & \cdots & \boldsymbol{y}_{2m+M-2}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{m\times M};$$

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_m & \boldsymbol{x}_{m+1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{m+M-1}\\ \boldsymbol{x}_{m+1} & \boldsymbol{x}_{m+2} & \cdots & \boldsymbol{x}_{m+M}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{x}_{2m-1} & \boldsymbol{x}_{2m} & \cdots & \boldsymbol{x}_{2m+M-2}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{m\times M};$$

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}\\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix},\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_0 & \boldsymbol{x}_1 & \cdots & \boldsymbol{x}_{M-1}\\ \boldsymbol{x}_1 & \boldsymbol{x}_2 & \cdots & \boldsymbol{x}_M\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{x}_{m-1} & \boldsymbol{x}_m & \cdots & \boldsymbol{x}_{m+M-2}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{m\times M},$$

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{p}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}_0 & \boldsymbol{y}_1 & \cdots & \boldsymbol{y}_{M-1}\\ \boldsymbol{y}_1 & \boldsymbol{y}_2 & \cdots & \boldsymbol{y}_M\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{y}_{m-1} & \boldsymbol{y}_m & \cdots & \boldsymbol{y}_{m+M-2}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{m\times M}。$$

因此，可以通过求解优化问题获得参数 $\boldsymbol{L}_x$ 和 $\boldsymbol{L}_w$，具体优化问题为

$$\min_{\boldsymbol{L}_w,\boldsymbol{L}_x}\|\boldsymbol{E}\|_{\mathrm{F}}^2\tag{8}$$

式中，$\|\boldsymbol{E}\|_{\mathrm{F}}$为矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的 Frobenius 范数。

根据正交投影原理，输出数据预测值 $\hat{\boldsymbol{Y}}_{\mathrm{f}}$ 可以通过 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}$ 在$\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}$空间的正交投影(用符号/表示)得到，即

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}\Big/\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}\tag{9}$$

$$[\boldsymbol{L}_x\quad\boldsymbol{L}_w]=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\tag{10}$$

根据伪逆计算公式可得

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}^{\dagger}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}\tag{11}$$

由于式(11)求得的矩阵过于庞大，因此采用 QR 分解与 SVD 分解对式(10)进行分析求解，以便获取参数 $\boldsymbol{L}_x$、$\boldsymbol{L}_w$，具体为

$$[\boldsymbol{L}_x\quad\boldsymbol{L}_w]=[\boldsymbol{R}_{31}\quad\boldsymbol{R}_{32}]\boldsymbol{V}_f\begin{bmatrix}\sigma_1^{-1} & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \sigma_2^{-1} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_f^{-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{U}_f^{\mathrm{T}}\tag{12}$$

式中：$[\boldsymbol{R}_{31}\quad\boldsymbol{R}_{32}]$为 QR 分解得到的相关矩阵，其余部分为 SVD 分解后相关矩阵；$\sigma_i(i=1,2,\cdots,f)$为 SVD 分解中对角矩阵的特征根，为保证矩阵逆的存在，在计算过程中不考虑特征根接近 0 的部分，选择 f 个特征根进行计算，使得 $\sigma_i>\mathrm{tol}$，$\forall 1\leqslant i\leqslant f$，tol 表示尽可能小的容许值；$\boldsymbol{V}_f$ 和 $\boldsymbol{U}_f$ 分别为左奇异向量矩阵 $\boldsymbol{V}$ 和右奇异向量矩阵 $\boldsymbol{U}$ 的前 f 列，同时 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 满足正交性条件 $\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}$。

通过求解 $\boldsymbol{L}_x$ 和 $\boldsymbol{L}_w$ 的值，即可根据离线数据计算电压基波输出预测值。

2.2 孤岛检测自适应滤波器设计

通过子空间电压基波输出预测器得到的电压基波预测值与实际测量电压基波输出数据的差值，由于存在系统不确定性干扰，故不能直接作为孤岛故障的指示信号，因此，本节设计孤岛检测自适应滤波器来降低不确定性对系统的影响，同时放大该差值信号。由式(4)可知，当系统处于正常工作状态时，误差 $\boldsymbol{e}(m)$ 是由系统的不确定性引起的，即

$$\boldsymbol{e}(m)=\Delta\boldsymbol{L}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}(m)\\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{p}}(m)\end{bmatrix}\tag{13}$$

由于系统的不确定性影响不能直接用某个已知函数模拟，因此利用系统正常工作的 m 时刻及其前、后 i 时间内的数据与其预测误差的数据 $\boldsymbol{E}^*$ 来对 $\Delta\boldsymbol{L}$ 进行分析。求解 $\Delta\boldsymbol{L}$ 时，要对某些指标进行最小化，具体为

$$\min_{\Delta\boldsymbol{L}_x,\Delta\boldsymbol{L}_w}\left\|\boldsymbol{E}^*-[\Delta\boldsymbol{L}_x\quad\Delta\boldsymbol{L}_w]\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{\mathrm{f}}^*\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}^*\end{bmatrix}\right\|_F^2\tag{14}$$

式中：

$$\boldsymbol{E}^{*}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+2} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+3} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i+1}\\ \boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+3} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+4} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i+2}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{e}^{*}_{m-j^{*}+1} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-j^{*}+2} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m}\end{bmatrix}$$，j^{*} 为矩阵长度；

$$\boldsymbol{X}^{*}_{\mathrm{f}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+2} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+3} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{m-i+1}\\ \boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+3} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+4} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{m-i+2}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{x}^{*}_{m-j^{*}+1} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-j^{*}+2} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{m}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{W}^{*}_{\mathrm{p}}\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}^{*\mathrm{T}}_{\mathrm{p}}\\ \boldsymbol{E}^{*}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{X}^{*}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}^{*}_{m-2i-j^{*}+2} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-2i-j^{*}+3} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{m-2i+1}\\ \boldsymbol{x}^{*}_{m-2i-j^{*}+3} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-2i-j^{*}+4} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{m-2i+2}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+1} & \boldsymbol{x}^{*}_{m-i-j^{*}+2} & \cdots & \boldsymbol{x}^{*}_{\boldsymbol{m-i}}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{E}^{*}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{e}^{*}_{m-2i-j^{*}+2} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-2i-j^{*}+3} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i+1}\\ \boldsymbol{e}^{*}_{m-2i-j^{*}+3} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-2i-j^{*}+4} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i+2}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+1} & \boldsymbol{e}^{*}_{m-i-j^{*}+2} & \cdots & \boldsymbol{e}^{*}_{m}\end{bmatrix}。$$

$$\Delta\boldsymbol{L}=[\Delta\boldsymbol{L}_{x}\quad\Delta\boldsymbol{L}_{w}]=[\boldsymbol{R}^{*}_{\Delta 31}\quad\boldsymbol{R}^{*}_{\Delta 32}]\cdot\boldsymbol{V}^{*}_{q\Delta}\begin{bmatrix}\sigma^{*\,-1}_{1\Delta} & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \sigma^{*\,-1}_{2\Delta} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \sigma^{*\,-1}_{q\Delta}\end{bmatrix}\boldsymbol{U}^{*\mathrm{T}}_{q\Delta}\tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{R}^{*}_{\Delta 31}$ 和 $\boldsymbol{R}^{*}_{\Delta 32}$ 均为 QR 分解所得上三角矩阵 $\boldsymbol{R}^{*}$ 的相应子块，分别对应于 $\Delta\boldsymbol{L}_{x}$ 与 $\Delta\boldsymbol{L}_{w}$ 的求解部分；$\boldsymbol{V}^{*}_{q\Delta}$ 和 $\boldsymbol{U}^{*}_{q\Delta}$ 分别为截断后保留的右奇异向量矩阵与左奇异向量矩阵，满足正交性条件 $\boldsymbol{V}^{*\,\mathrm{T}}_{q\Delta}\boldsymbol{V}^{*}_{q\Delta}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{U}^{*\,\mathrm{T}}_{q\Delta}\boldsymbol{U}^{*}_{q\Delta}=\boldsymbol{I}$；$\sigma^{*}_{q\Delta}$ 为相应矩阵的第 q 个奇异值。

由于孤岛检测自适应滤波器 F 需要尽可能减小系统不确定性影响，并尽可能放大故障信号，故目标函数 $\boldsymbol{J}$ 为

$$\boldsymbol{J}=\max\frac{\|\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\|}{\|\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}\|}\tag{16}$$

当 $\boldsymbol{J}$ 达到最优值时，孤岛检测自适应滤波器达到预期，首先对 $[\Delta\boldsymbol{L}_{x}\quad\Delta\boldsymbol{L}_{w}]$ 分析，由式(15)进行奇异值分解，可表示为

$$\Delta\boldsymbol{L}=[\Delta\boldsymbol{L}_{x}\quad\Delta\boldsymbol{L}_{w}]=[\Delta\boldsymbol{R}_{31}\quad\Delta\boldsymbol{R}_{32}]\cdot\boldsymbol{V}_{\Delta\mathrm{f}}\begin{bmatrix}\sigma_{\Delta\mathrm{f}_{1}}{}^{-1} & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \sigma_{\Delta\mathrm{f}_{2}}{}^{-1} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{\Delta\mathrm{f}_{m}}{}^{-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta\mathrm{f}}\tag{17}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{R}_{31}$ 和 $\Delta\boldsymbol{R}_{32}$ 如为 QR 分解所得上三角矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的相应子块，分别对应于 $\Delta\boldsymbol{L}_{x}$ 与 $\Delta\boldsymbol{L}_{w}$ 的求解部分；$\boldsymbol{V}_{\Delta\mathrm{f}}$ 和 $\boldsymbol{U}_{\Delta\mathrm{f}}$ 分别为截断后保留的右奇异向量矩阵与左奇异向量矩阵，满足正交性条件 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{\Delta\mathrm{f}}\boldsymbol{V}_{\Delta\mathrm{f}}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta\mathrm{f}}\boldsymbol{U}_{\Delta\mathrm{f}}=\boldsymbol{I}$；$\sigma_{\Delta\mathrm{f}_{m}}$ 为相应矩阵的第 m 个奇异值。

由于 $\Delta\boldsymbol{L}=[\Delta\boldsymbol{L}_{x}\quad\Delta\boldsymbol{L}_{w}]$ 可被 SVD 分解，故 $\Delta\boldsymbol{L}$ 可改写为

$$\Delta\boldsymbol{L}=[\Delta\boldsymbol{L}_{x}\quad\Delta\boldsymbol{L}_{w}]=\boldsymbol{U}_{\Delta}\boldsymbol{\Sigma}_{\Delta}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{\Sigma}_{\Delta}$ 为对象矩阵，$\boldsymbol{\Sigma}_{\Delta}=\mathrm{diag}(\sigma_{\Delta 1},\sigma_{\Delta 2},\cdots,\sigma_{\Delta n})$；$\boldsymbol{U}_{\Delta}$、$\boldsymbol{V}_{\Delta}$ 均为正交矩阵。当 $\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_{1}\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}$ 时，$\boldsymbol{S}_{\Delta}=\mathrm{diag}(\sigma_{\Delta 1},\sigma_{\Delta 2},\cdots,\sigma_{\Delta n})$，$\boldsymbol{F}_{1}$ 为任意给定的非零矩阵，则对于 $\forall\boldsymbol{F}_{1}\neq\boldsymbol{0}$ 有

$$\|\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}\|=\|\boldsymbol{F}_{1}\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\cdot\boldsymbol{U}_{\Delta}\boldsymbol{\Sigma}_{\Delta}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\|=\|\boldsymbol{F}_{1}\|\tag{19}$$

根据范数的相容性可知

$$\frac{\|\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\|}{\|\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}\|}=\frac{\|\boldsymbol{F}_{1}\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\|}{\|\boldsymbol{F}_{1}\|}\leqslant\frac{\|\boldsymbol{F}_{1}\|\cdot\|\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\|}{\|\boldsymbol{F}_{1}\|}=\|\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\cdot\boldsymbol{G}_{f}\|\tag{20}$$

由式(20)可知，当 $\boldsymbol{F}_{1}=\boldsymbol{I}$ 时 $\frac{\|\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{G}_{\mathrm{f}}\|}{\|\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{L}\|}$ 取得最大值，此时

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\tag{21}$$

则联立式(5)和式(21)可得残差 $\boldsymbol{r}(m)$ 为

$$\boldsymbol{r}(m)=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{e}(m)=\boldsymbol{S}^{-1}_{\Delta}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}_{\Delta}\cdot[\boldsymbol{y}(m)-\hat{\boldsymbol{y}}(m)]\tag{22}$$

因为系统中存在不确定性干扰，所以要实现对不确定性影响的实时性跟踪，故孤岛检测自适应滤波器 F 的参数要根据检测得到的数据进行实时变化，其更新原理如图 3 所示，图中 m 为时间、n 为采样点个数。

随着时间 m 不断变化，当满足采样间隔时，对其进行采样，用新产生的数据来确定新的 ΔL，并计算得到 F 的参数；当不满足采样间隔时，则利

用上一次产生的最新参数进行检测。

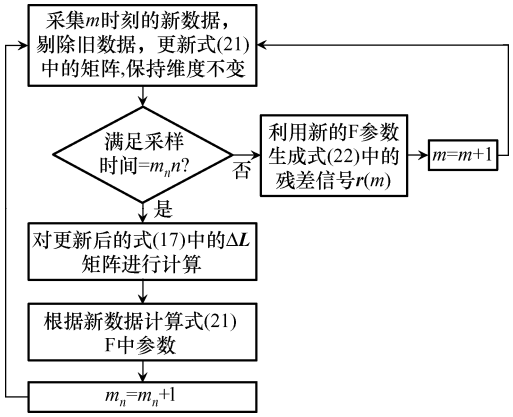


图 3　孤岛检测自适应滤波器 F 算法更新流程

Fig. 3 Flow chart of updating the algorithm for islanding detection adaptive filter F

2.3 孤岛检测器设计

经过孤岛检测自适应滤波器处理 $\boldsymbol{e}(m)$ 后，可以得到残差信号 $\boldsymbol{r}(m)$，但是由于在负载谐振情况下，电压、电流变化不明显，因此 $\boldsymbol{r}(m)$ 在孤岛故障前、后变化时间较长，不能完全作为参考依据，需进一步设计孤岛指示信号用以指示孤岛检测。因此设计孤岛检测器对 $\boldsymbol{r}(m)$ 进行生成孤岛指示信号 $\boldsymbol{D}(m)$，同时设定适当的阈值作为判断孤岛的标准。由于电压 2 次谐波信号 $\boldsymbol{g}(m)$ 会在孤岛故障后快速发生明显变化，因此首先选取残差信 $\boldsymbol{r}(m)$ 与 $\boldsymbol{g}(m)$ 生成 $\boldsymbol{D}(m)$。$\boldsymbol{D}(m)$ 可更加迅速准确地反映孤岛故障是否发生，其表达式为

$$\boldsymbol{D}(m)=\boldsymbol{r}(m)\cdot\boldsymbol{g}(m) \tag{23}$$

当 $\boldsymbol{D}(m)$ 超过设定的阈值时，则判定孤岛故障发生；反之，则认为未发生孤岛故障，光伏发电系统处于正常工作状态。当光伏发电系统工作条件发生变化或负载变化等导致实际测量信号发生变化，并与预测值相差较大时，由于孤岛指示信号中的电压 2 次谐波信号不一定发生剧烈变化，因此大大降低了误判的可能性。令设定阈值为 $\boldsymbol{D}_{\text{th}}$，则可得到判断标准为

$$\begin{cases}\boldsymbol{D}(m)>\boldsymbol{D}_{\text{th}} & \text{孤岛发生}\\ \boldsymbol{D}(m)\leqslant\boldsymbol{D}_{\text{th}} & \text{孤岛未发生}\end{cases} \tag{24}$$

3　仿真结果

为了验证所提出算法的有效性，本文通过 MATALB 的 Simulink 平台进行仿真。搭建如图 4 所示的仿真系统，系统由分布式直流电源、逆变器、LC 滤波器、大电网、本地负载、SPWM 发生器、数据驱动子空间电压输出预测器、孤岛检测自适应滤波器等组成，具体参数见表 1。

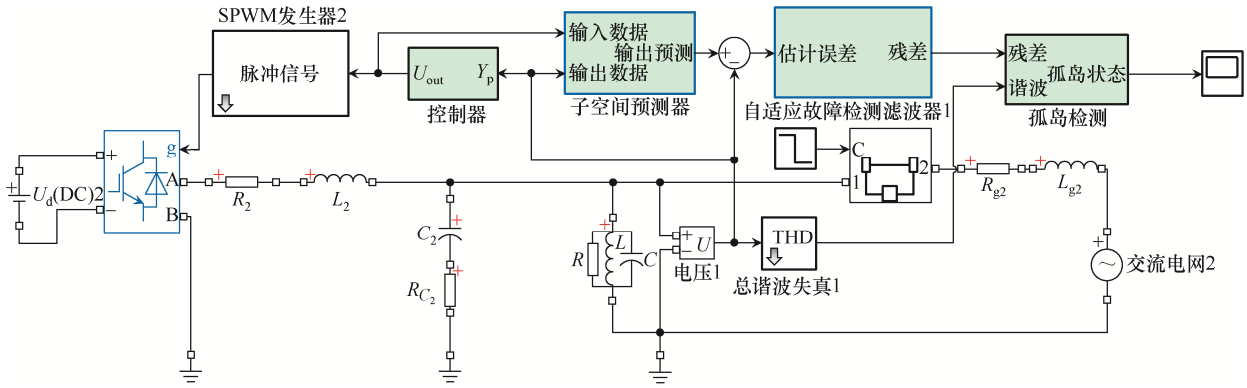


图 4　MATALB 仿真模型

Fig. 4 MATLAB simulation model

3.1 数据驱动子空间预测方法有效性验证

设定仿真时间为 10.000 s，预测窗口长度为 5，采用 n=1 000 根据式(18)对输入、输出测量值 $\boldsymbol{X}_{\text{P}}$、$\boldsymbol{X}_{\text{f}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{P}}$、$\boldsymbol{Y}_{\text{f}}$ 矩阵构造矩阵参数 $\boldsymbol{L}_x$、$\boldsymbol{L}_w$。将 PCC 处的电压作为输入值 $\boldsymbol{y}(m)$，通过设计的数据驱动子空间电压基波输出预测器，得到预测值 $\hat{\boldsymbol{y}}(m)$ 与误差 $\boldsymbol{e}(m)$，如图 5 所示。在 9.500 s 时通过设置开关 Breaker 使控制信号跳变，造成孤岛故障。

通过对 PCC 处电压的预测跟踪，可得通过处理后的残差信号，如图 6 所示，可发现在设定时间发生孤岛故障后，残差发生变化，反映了孤岛故障的发生。

表 1 孤岛模型系统元件参数

Tab. 1 Parameters of components in islanding model system

参数	数值
逆变器额定功率/ kVA	6
直流侧电压/V	360
IGBT 切换频率/kHz	10
采样频率/kHz	10
线电阻/Ω	0.01
LC 滤波器电感/mH	8
LC 滤波器电容/μF	80
本地负载 R/Ω	15
本地负载 L/mH	17.4
本地负载 C/μF	493.28
电网电压/V	220
电网频率/Hz	50
电网阻抗(电阻)/Ω	0.1
电网阻抗(电感)/mH	0.1

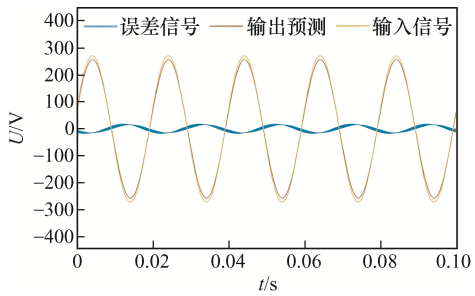


图 5 数据驱动子空间电压预测器的输出预测

Fig. 5 Output prediction based on data-driven subspace-based voltage predictor

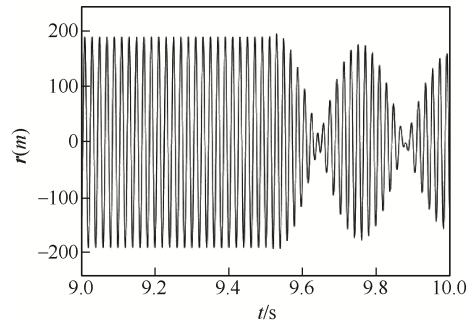


图 6 残差变化示意

Fig. 6 Schematic of changes in residuals

当残差信号通过孤岛检测器与电压 2 次谐波信号生成孤岛指示信号后，将该信号与设定阈值 $\boldsymbol{D}_{\text{th}}$ 进行比较，判断孤岛故障是否发生。当阈值设定过小时，容易因为较大的扰动或系统允许发生的瞬时变化造成误警；阈值设定过大时，若残差信号变化较小则容易发生漏报，因此采用数据统计学中的 3σ 原则计算 $\boldsymbol{D}_{\text{th}}$。$3\sigma$ 原则是统计学中 1 种常用的误差判断原则，常用于质量控制、过程管理中异常值的检测与判定[26]。由图 7(a)可以看到，在 9.500s 孤岛故障发生后，孤岛指示信号 $\boldsymbol{D}(m)$ 在 0.010s 内跳变，超过阈值 $\boldsymbol{D}_{\text{th}}$，显示孤岛故障，响应时间满足表 2 中 IEEE Std. 1547—2018 的规定。

表 2 IEEE Std. 1547—2018 关于孤岛检测要求

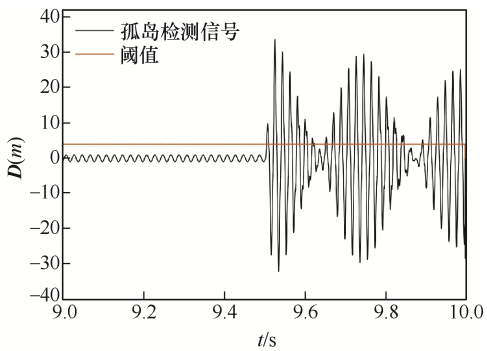
Tab. 2 Requirements of IEEE Std. 1547—2018 for islanding detection

电压	频率/Hz	检测时间/s
$U<0.50U_{\text{N}}$	f_{N}	0.16
$0.50U_{\text{N}}<U<0.88U_{\text{N}}$	f_{N}	2.00
$0.88U_{\text{N}}<U\leqslant 0.88U_{\text{N}}$	f_{N}	不动作
$1.10U_{\text{N}}<U\leqslant 1.37U_{\text{N}}$	f_{N}	1.00
$U>1.37U_{\text{N}}$	f_{N}	0.16
U_{N}	$f<f_{\text{N}}-0.7$	0.16
U_{N}	$f<f_{\text{N}}+0.5$	0.16

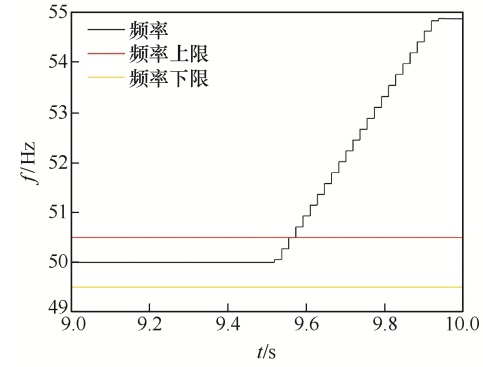
3.2 数据驱动子空间预测方法优越性验证

3.2.1 孤岛情况

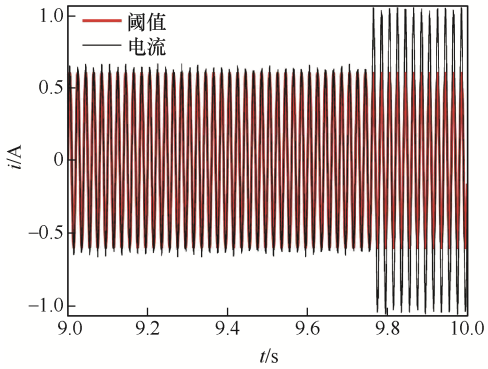
在同等条件下，对自适应主动移频孤岛检测[27]、注入电流的主动式孤岛检测[28]与线性 2 次高斯 LQG(linear-quadratic-Gaussian)预测的被动式孤岛检测进行仿真，得到图 7(b)、(c)、(d)所示的检测结果，可知数据驱动子空间的方法检测速度更快。



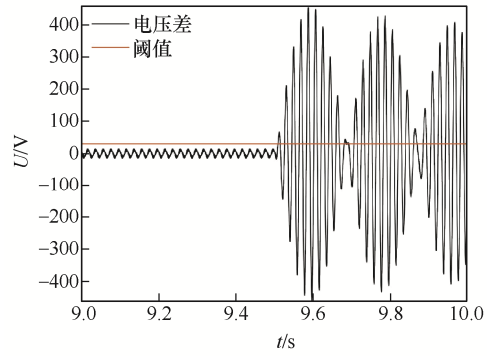
(a) 数据驱动子空间方法



(b) 自适应主动频移方法



(c) 注入电流的主动式方法

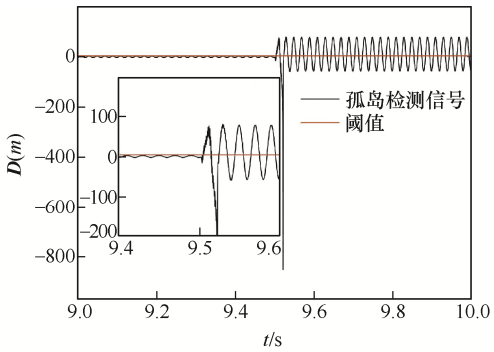


(d) LQG预测方法

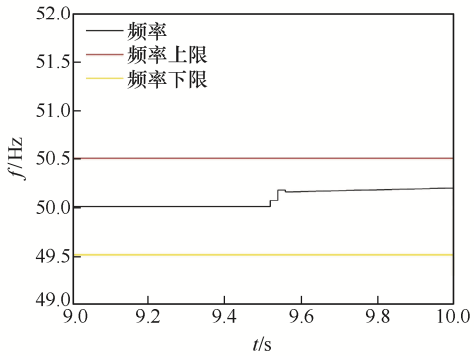
图 7　谐振负载下各方法的检测仿真结果

Fig. 7 Simulation results using each detection method under resonance load

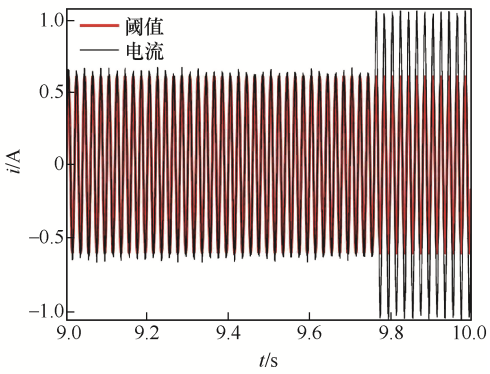
在感性负载与容性负载的情况下，分别对 4 种孤岛检测方法进行仿真可得如图 8、图 9 所示的仿真结果。在感性负载情况下，数据驱动子空间孤岛方法检测在 0.006 s 时，便可检测到孤岛故障发生；而自适应的主动移频孤岛检测方法则存在盲区，无法检测；注入电流的主动式孤岛检测方法则需要超过 0.200 s 的时间；LQG 预测的被动式孤岛检测方法需要 0.010 s 的时间。因此，在感性负载情况下，数据驱动子空间方法的检测时间相较于其他 3 种方法更加迅速。



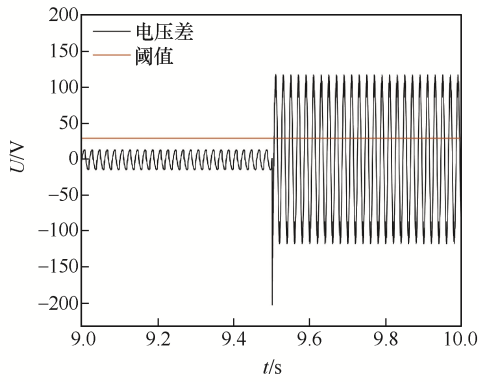
(a) 数据驱动子空间方法



(b) 自适应主动频移方法



(c) 注入电流的主动式方法



(d) LQG预测方法

图 8　感性负载下各方法的检测仿真结果

Fig. 8 Simulation results using each detection method under inductive load

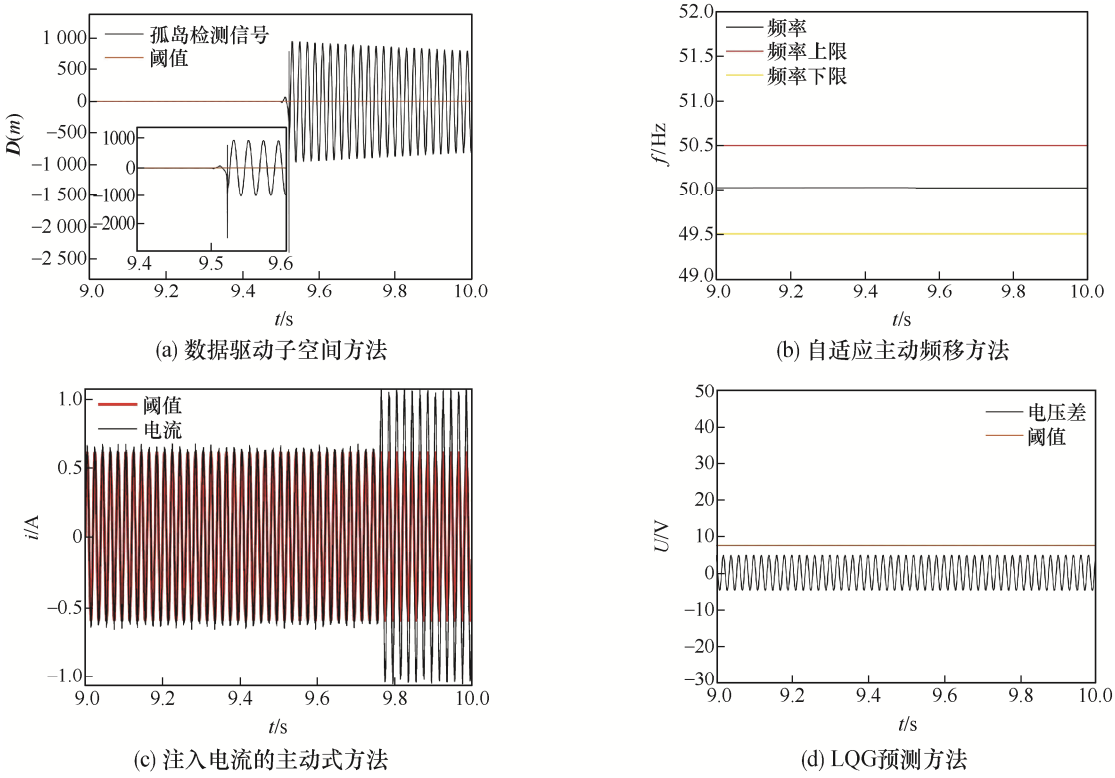


图 9 容性负载下各方法的检测仿真结果

Fig. 9 Simulation results using each detection method under capacitive load

在容性负载的情况下，由图 9 可知数据驱动子空间孤岛检测方法在 0.020 s 内可完成检测，自适应的主动移频孤岛检测方法存在盲区，注入电流的主动式孤岛检测方法需要的时间超过 0.200 s，LQG 预测的被动式孤岛检测方法也存在盲区。因此，在容性负载情况下，数据驱动子空间方法更具有优势。

同时，在多机并联的情况下，孤岛检测方案采用数据驱动子空间方法，相较于其他传统的孤岛检测方法不容易受到稀释效应的影响，因为其并非过度依赖于电压和电流的频率、相位。因此，多机并联的情况下，数据驱动子空间方法依然可以进行孤岛检测，且具有优势。为了验证该结论，建立如图 10 所示的多机并联系统，在负载谐振的情况下，

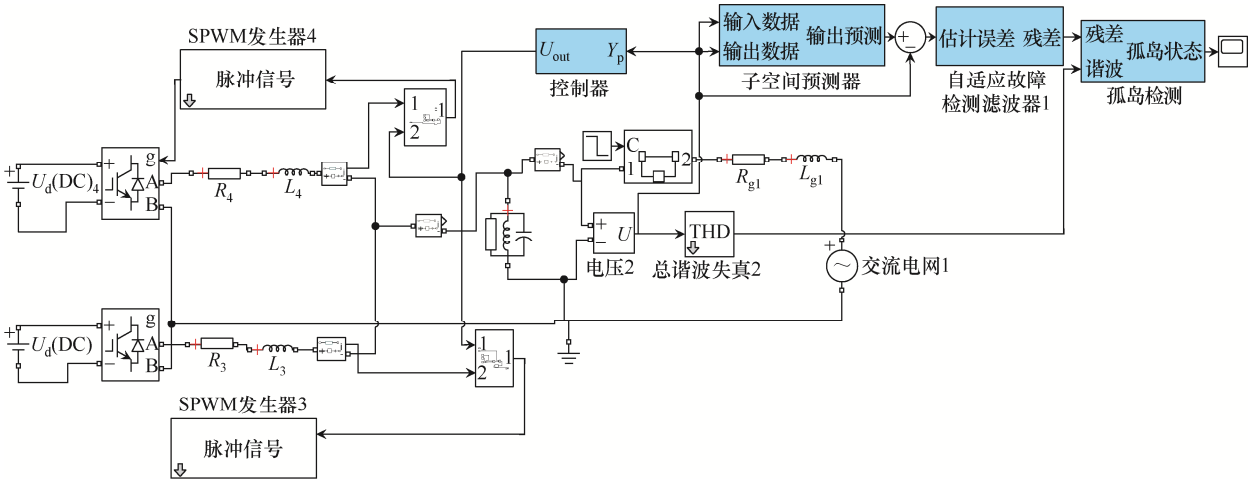


图 10 多机并联 MATLAB 仿真模型

Fig. 10 MATLAB simulation model of multi-machine parallel system

其与自适应主动频移方法、LQG 预测方法检测得到的仿真结果如图 11 所示。数据驱动子空间的方法可在表 2 与表 3 规定的时间内完成孤岛检测，而在此种情况下的自适应主动频移方法、LQG 预测方法均无法检测。

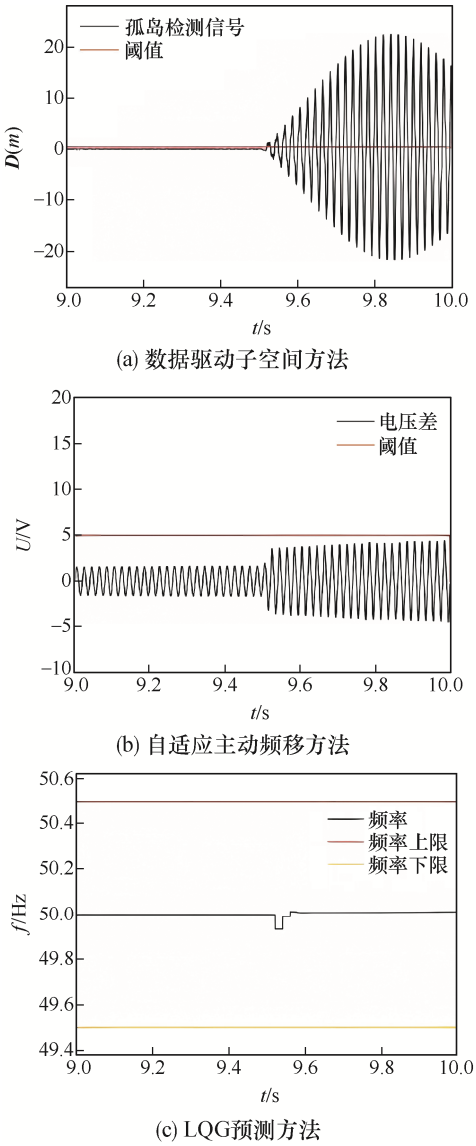


图 11　多机并联谐振负载下各方法的检测仿真结果

Fig. 11 Simulation results using each detection method for multi-machine parallel system under resonance load

3.2.2　非孤岛情况

在光伏发电系统运行过程中，由于实际生产生活的需要，时常需要对负载进行切换，该种情况属于非孤岛情况，但是由于切换时会发生电压、电流等指标的瞬时变化，因此容易发生孤岛误判。为了验证数据驱动子空间在非孤岛情况下的有效性，对负载切换进行仿真实验，在 9.500 s 时设定负载切换，得到的仿真结果如图 12 所示。由图可知，在发生切换瞬间，孤岛指示信号发生变化，但是在 0.025 s 内，孤岛指示信号恢复到正常状态。这说明在负载切换这种非孤岛情况下，该方法不会进行误判。

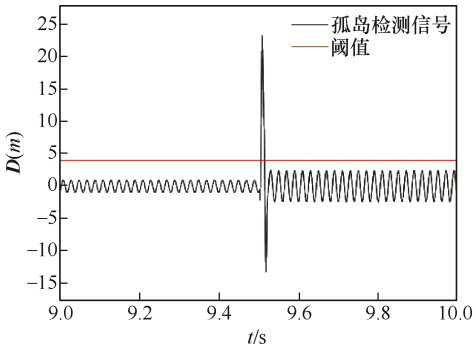


图 12　非孤岛(负载切换)情况下的数据驱动子空间检测结果

Fig. 12 Data-driven subspace-based detection results in the case of non-islanding (load switching)

4　结语

本文针对光伏发电系统中故障发生导致孤岛效应出现的问题，设计了基于数据驱动子空间算法的孤岛检测方案。该方案未主动注入干扰源，未造成电能质量的额外损失，有效去除了系统不确定性干扰，解决了传统过/欠电压/电流孤岛检测方法的检测盲区问题。首先针对光伏并网发电系统容易发生孤岛故障的问题，构建了单相光伏发电并网系统 Simulink 模型；然后通过设计数据驱动子空间预测器与自适应滤波器及孤岛检测器，实现对谐振、感性、容性 3 种负载下的孤岛故障检测，验证其有效性；最后通过单机模型与多机并联模型中多种孤岛检测方法的对比，进一步验证了其优越性。

参考文献：

[1] 张晓阳, 李田泽, 张涵瑞, 等. 应用于光伏阵列故障诊断的 DA-SOM 算法研究[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 122-128.

Zhang Xiaoyang, Li Tianze, Zhang Hanrui, et al. Study on DA-SOM algorithm applied to fault diagnosis of photovoltaic array [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 122-128. (in Chinese)

[2] 佘然, 徐永海, 蒋海玮. 不平衡电压暂降下考虑电流峰值的多目标光伏逆变器控制策略[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 88-97.
She Ran, Xu Yonghai, Jiang Haiwei. Multi-objective PV inverter control strategy considering current peak value under unbalanced voltage sag [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 88-97. (in Chinese)

[3] Sagar J, Singh O, Urooj S. Islanding detection scheme for single-phase grid-connected solar photovoltaic system using support vector machine[M]// Advances in Energy Technology. Singapore: Springer Singapore, 2021: 97-109.

[4] Yang Fuwen, Xia Nan, Han Qinglong. Event-based networked islanding detection for distributed solar PV generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 322-329.

[5] Reddy V R, Sreeraj E S. A feedback-based passive islanding detection technique for one-cycle-controlled single-phase inverter used in photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6541- 6549.

[6] Barkat F, Cheknane A, Guerrero J M, et al. Review, analysis, and performance evaluation of the most common four active methods for islanding detection in grid-connected photovoltaic systems [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214: 108909.

[7] 马雯, 郭强, 李山. LCL 电压型整流器模型预测优化控制[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 38-46.
Ma Wen, Guo Qiang, Li Shan. Model predictive optimal control of LCL voltage source rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 38-46. (in Chinese)

[8] Govindasamy H S, Jayaraman R, Taspinar B, et al. Air quality management: An exemplar for model-driven digital twin engineering [C]// 2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C). Fukuoka, Japan, 2021: 229-232.

[9] Yan Yujia, Wu Guangxin, Dong Yang, et al. An improved MSR-based data-driven detection method using smoothing pre-processing [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28: 444-448.

[10] 刘萍, 李泽文, 蔡雨思, 等. 基于等效电路模型和数据驱动模型融合的SOC和SOH联合估计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3232-3243.
Liu Ping, Li Zewen, Cai Yusi, et al. Joint estimation method of SOC and SOH based on fusion of equivalent circuit model and data-driven model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(10): 3232-3243.

[11] Zhang Yifang, Han Bing, Han Min. A novel distributed data-driven strategy for fault detection of multi-source dynamic systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(11): 4379-4383.

[12] Liu Shuming, Zheng Chen, Zhang Bo, et al. A data-driven self-learning evaluation method of voltage sag severity [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2022, 7(3): 328-334.

[13] Gorjão L R, Anvari M, Kantz H, et al. Data-driven model of the power-grid frequency dynamics [J]. IEEE Access, 2020, 8: 43082-43097.

[14] 张剑, 崔明建, 何怡刚. 结合数据驱动与物理模型的主动配电网双时间尺度电压协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1327-1339.
Zhang Jian, Cui Mingjian, He Yigang. Dual timescales coordinated and optimal voltages control in distribution systems using data-driven and physical optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1327- 1339.

[15] Lee Y H, Kim S J, Lee K Y, et al. Online robust subspace clustering with application to power grid monitoring [J]. IEEE Access, 2023, 11: 27816-27828.

[16] Chen Jianmin, Yang Fuwen. Data-driven subspace-based adaptive fault detection for solar power generation systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(11): 1498-1508.

[17] Rabuzin T, Nordström L. Data-driven islanding detection using a principal subspace of voltage angle differences [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4250-4258.

[18] Hosur S, Duan Dongliang. Subspace-driven output-only based change-point detection in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1068-1076.

[19] Seyedi M, Taher S A, Ganji B, et al. A hybrid islanding detection method based on the rates of changes in voltage and active power for the multi-inverter systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2800-2811.

[20] Afrin N, Islam M, Lu Junwei, et al. Sensitivity based voltage support strategy to enhance dynamic stability of islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 3111-3120.

[21] Kim D U, Kim S. Anti-islanding detection method using phase-shifted feed-forward voltage in grid-connected inverter [J]. IEEE Access, 2019, 7: 147179-147190.

[22] 曹德发, 王彬, 李志华, 等. 考虑故障穿越和时变延迟的孤岛微网电压功率控制[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 152-162.
Cao Defa, Wang Bin, Li Zhihua, et al. Voltage and power control of isolated island microgrid considering fault crossing and time-varying delay [J]. Journal of Power Supply, 2024,22(4):152-162. (in Chinese)

[23] 赵禹灿, 姜旭, 孙福寿, 等. 基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 41-50.
Zhao Yucan, Jiang Xu, Sun Fushou, et al. Simultaneous detection method for photovoltaic islanding and low-voltage-ride-through based on harmonic characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 41-50. (in Chinese)

[24] 吕干云, 吴启宇, 吴晨媛, 等. 基于双向谐波电压变动的光伏并网孤岛检测[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 194-199.
Lü Ganyun, Wu Qiyu, Wu Chenyuan, et al. Islanding detection of grid-connected PV system based on bi-direction voltage harmonic variation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 194-199. (in Chinese)

[25] 宋绍楼, 马超, 刘昕明, 等. 一种混合低谐无盲区的孤岛检测方法[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 328-335.
Song Shaolou, Ma Chao, Liu Xinming, et al. Hybrid low-harmonic islanding detection method without non-detection zone [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 328-335. (in Chinese)

[26] 程玉强, 邓凌志. Wasserstein 距离在液体火箭发动机故障检测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(4): 20-27.
Cheng Yuqiang, Deng Lingzhi. Application of Wasserstein distance in fault detection for liquid-propellant rocket engines [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(4): 20-27. (in Chinese)

[27] 余运俊, 衷国瑛, 范瑞祥, 等. 基于 SMS 法和 AFD 法的光伏孤岛检测对比研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1572-1580.
Yu Yunjun, Zhong Guoying, Fan Ruixiang, et al. Comparative study of photovoltaic islanding detection based on SMS and AFD [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1572-1580. (in Chinese)

[28] 李洋. 主动电流幅值扰动的孤岛检测方法[J]. 电气电子教学学报, 2016, 38(3): 67-70, 87.
Li Yang. Research of islanding detection based on active current amplitude perturbation [J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2016, 38(3): 67-70, 87. (in Chinese)



陈恩怜

作者简介：

陈恩怜(1999—　)，女，硕士研究生。研究方向：光伏并网系统孤岛检测。E-mail：202130510049@stu.shmtu.edu.cn。

陈建民(1986—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：船舶电力系统及能量管理。E-mail: cjm100@126.com。

张依恋(1987—　)，女，通信作者，博士，讲师。研究方向：配电网风险评估与主动防御技术。E-mail: zhangyl@shmtu.edu.cn。

范勤勤(1986—　)，男，博士，副教授。研究方向：智能电网系统优化算法。E-mail: qqfan@shmtu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)