DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.347 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于残差的高阻故障检测与容错控制策略

马 原[1]，刘佳林[1]，陈 璨[1]，徐广达[1]，马鑫晟[1]，张 赛[2]
(1.国网冀北电力有限公司电力科学研究院，北京 100032；2.国网北京市电力公司昌平供电公司，北京 100051)

摘要：针对微电网孤岛运行模式下逆变器线路出现单相接地高阻故障引起的系统电压不平衡的问题，提出一种基于残差生成器的零轴高阻故障检测和容错控制方法，以降低系统电压的不平衡度。首先，建立四桥臂逆变器 *dq*0 轴的状态空间模型，分析高阻故障对输出电压的影响。其次，基于左右互质分解和欧拉参数化理论设计残差生成器得到残差，利用巴特沃斯带通滤波器生成零轴残差分量，进行故障检测。然后，从零轴扰动对消的角度通过模型匹配理论设计零轴容错控制器，并利用线性矩阵不等式法进行求解。最后，利用 PXI 半实物仿真平台进行高阻故障检测和容错控制实验，验证该方法的可行性。

关键词：高阻故障；不平衡；残差生成器；容错控制；四桥臂

High-resistance Fault Detection and Fault-tolerant Control Strategy Based on Residuals

MA Yuan[1], LIU Jialin[1], CHEN Can[1], XU Guangda[1], MA Xinsheng[1], ZHANG Sai[2]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100032, China; 2. Changping Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China)

Abstract: Aimed at the problem of system voltage imbalance caused by single-phase grounding high-resistance faults in inverter lines in an islanding operation mode of microgrids, a zero-axis high-resistance fault detection and fault-tolerant control method based on a residual generator is proposed to reduce the degree of system voltage imbalance. First, a state space model for the *dq*0 axis of a four-bridge-arm inverter is established, and the impact of high-resistance faults on output voltage is analyzed. Second, based on the theory of left and right coprime decomposition and Euler parameterization, a residual generator is designed to obtain residuals, and a Butterworth bandpass filter is used to generate zero-axis residual components for fault detection. Third, from the perspective of zero-axis disturbance cancellation, a zero-axis fault-tolerant controller is designed using the model matching theory, which is further solved using a linear matrix inequality method. Finally, high-resistance fault detection and fault-tolerant control experiments were conducted using a PXI semi-physical simulation platform to verify the feasibility of the proposed method.

Keywords: High-resistance fault; imbalance; residual generator; fault-tolerant control; four-bridge-arm

近年来，随着新能源的快速发展，微电网作为整合各分布式发电单元的重要工具，具有绿色低碳、降低输电成本、提高运行可靠性等优势，越来越受到相关学者的广泛关注[1-4]。然而，在微电网快速发展的同时，也面临着诸多问题。在孤岛运行模式下，微电网输出的电压经过配电线路输送给用户，大风、雷击等事件会造成输电线路垂落或断裂坠地，使其与高阻抗接地介质发生接触，从而发生以单相接地为主的高阻故障，且由于接地电阻大、零序电压特征不明显等原因，高阻故障难

收稿日期：2024-11-25；**修回日期**：2024-12-22；**录用日期**：2025-02-07；**网络首发日期**：2025-03-07
基金项目：国网冀北电力有限公司电力科学研究院科技项目(B3018K230008)
This work is supported by Science and Technology Project of Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. under the grant B3018K230008

以检测。而高阻故障会引起微电网母线电压出现三相不平衡现象，降低微电网的电能质量[5-9]。

针对上述问题，文献[10]提出了一种基于零序李萨如曲线分析的高阻接地故障抗扰检测方法，实现了电容投切扰动下的高阻故障检测；文献[11]提出了一种基于相电压与零序电流相位比较的中性点不接地系统高阻接地故障保护方法，提高了系统的耐过渡电阻能力。但文献[10-11]所提方法设计复杂性较高。文献[12]针对传统行波保护在高阻故障下灵敏度低的问题，提出了一种基于故障电压线模分量补偿的改进行波保护方案，以准确识别直流线路的故障；文献[13]提出了一种基于特征谐波测量阻抗的新型故障定位方法用来获得精确的故障距离和识别故障支路，消除了故障电阻。但文献[12-13]缺少针对交流线路故障的研究。文献[14]提出了一种无模型自适应主动容错控制策略来恢复多种故障，但其研究的是风电机组；文献[15-16]提出了一种基于双绕组容错永磁电机驱动系统的双模式控制策略，提高了绕组开路故障下的容错能力，但未考虑单相接地故障的情况。

为解决微电网中高阻故障难以检测和引起电能质量不平衡等问题，本文以四桥臂逆变器为研究对象，提出一种基于残差生成器的零轴高阻故障检测和容错控制方法。该方法无需采集负载不平衡电流，而是设计残差生成器生成零序残差驱动容错控制器，节省了采集器成本；其既可检测出高阻故障，又可抑制高阻故障导致的三相电压不平衡，提高微电网的电能质量。

1 三相四桥臂逆变器建模

与三桥臂逆变器的 3 桥臂 3 线相比，四桥臂逆变器拥有 4 桥臂和 4 线，其第 4 桥臂输出电压经过滤波器后直接接地，中间没有线路，拓扑如图 1 所示[17-19]。图中：u_{DC}、L_f、r_L、C_f分别为直流电压、滤波电感、滤波电阻、滤波电容；U_{id}、U_{iq}、U_{iz}分别为逆变桥输出的 d、q、0 轴电压；I_{ld}、I_{lq}、I_{lz}分别为前 3 桥臂的滤波电感 d、q、0 轴电流；U_{od}、U_{oq}、U_{oz}为滤波器输出 d、q、0 轴电压；I_{oabc}为负载正弦电流；L_{line}、r_{line}分别为线路电感参数、线路电阻参数；Z_{load} 为负载阻抗；R_g 为接地电阻；I_{ln}为第 4 桥臂的滤波电感电流。

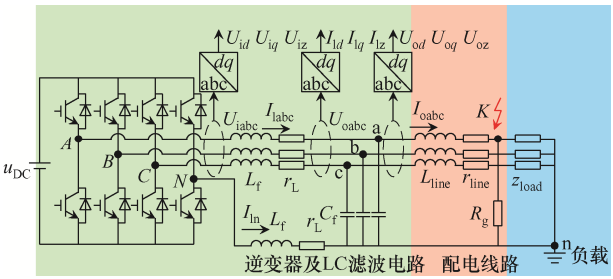


图 1 四桥臂逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of four-bridge-arm inverter

由图 1 可得三相四桥臂逆变器的微分方程为

$$\begin{cases} U_{AN}=L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{la}}{\mathrm{d}t}+r_LI_{la}-r_LI_{ln}-L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{ln}}{\mathrm{d}t}+U_{an} \\ U_{BN}=L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{lb}}{\mathrm{d}t}+r_LI_{lb}-r_LI_{ln}-L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{ln}}{\mathrm{d}t}+U_{bn} \\ U_{CN}=L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{lc}}{\mathrm{d}t}+r_LI_{lc}-r_LI_{ln}-L_f\dfrac{\mathrm{d}I_{ln}}{\mathrm{d}t}+U_{cn} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} I_{la}=C_f\dfrac{\mathrm{d}U_{oan}}{\mathrm{d}t}+I_{oa} \\ I_{lb}=C_f\dfrac{\mathrm{d}U_{obn}}{\mathrm{d}t}+I_{ob} \\ I_{lc}=C_f\dfrac{\mathrm{d}U_{ocn}}{\mathrm{d}t}+I_{oc} \end{cases} \tag{2}$$

式中：U_{AN}、U_{BN}、U_{CN}为前 3 桥臂中点与第 4 桥臂中点之间的电压；U_{an}、U_{bn}、U_{cn} 为滤波电容上的电压；I_{la}、I_{lb}、I_{lc}为前 3 桥臂的滤波电感正弦电流；U_{oan}、U_{obn}、U_{ocn}为逆变器输出三相电压。U_{AN}、U_{BN}、U_{CN}和 u_{DC}的关系为

$$\begin{cases} U_{AN}=(S_a-S_n)u_{DC} \\ U_{BN}=(S_b-S_n)u_{DC} \\ U_{CN}=(S_c-S_n)u_{DC} \end{cases} \tag{3}$$

式中，S_a、S_b、S_c、S_n为开关函数。联立式(1)~式(3)可得四桥臂逆变器模型为

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_P(s)/dt=\boldsymbol{A}_P(s)\boldsymbol{x}_P(s)+\boldsymbol{B}_P\boldsymbol{u}_P(s)+\boldsymbol{E}_P(s)\boldsymbol{d}_P(s) \\ \boldsymbol{y}_P(s)=\boldsymbol{C}_P(s)\boldsymbol{x}_P(s) \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{\mathrm{P}}=\begin{bmatrix} -r_{\mathrm{L}}/L_{\mathrm{f}} & \omega & 0 & -1/L_{\mathrm{f}} & 0 & 0 \\ -\omega & -\dfrac{r_{\mathrm{L}}}{L_{\mathrm{f}}} & 0 & 0 & -1/L_{\mathrm{f}} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{\mathrm{L}}/L_{\mathrm{f}} & 0 & 0 & -1/4L_{\mathrm{f}} \\ 1/C_{\mathrm{f}} & 0 & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & 1/C_{\mathrm{f}} & 0 & -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_{\mathrm{f}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{P}}=\begin{bmatrix} 1/L_{\mathrm{f}} & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_{\mathrm{f}} & 0 \\ 0 & 0 & 1/4L_{\mathrm{f}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{E}_{\mathrm{P}}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1/C_{\mathrm{f}} & 0 & 0 \\ 0 & -1/C_{\mathrm{f}} & 0 \\ 0 & 0 & -1/C_{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{I}_{6\times 6} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\mathrm{P}}(s)$、$\boldsymbol{u}_{\mathrm{P}}(s)$、$\boldsymbol{d}_{\mathrm{P}}(s)$、$\boldsymbol{y}_{\mathrm{P}}(s)$分别为状态量、输入量、扰动量、输出量，$\boldsymbol{x}_{\mathrm{P}}(s)=[I_{ld}\ \ I_{lq}\ \ I_{lz}\ \ U_{od}\ \ U_{oq}\ \ U_{oz}]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{u}_{\mathrm{P}}(s)=[U_{md}\ \ U_{mq}\ \ U_{mz}]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{d}_{\mathrm{P}}(s)=[I_{od}\ \ I_{oq}\ \ I_{oz}]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{y}_{\mathrm{P}}(s)=[I_{ld}\ \ I_{lq}\ \ I_{lz}\ \ U_{od}\ \ U_{oq}\ \ U_{oz}]^{\mathrm{T}}$，$U_{md}$、$U_{mq}$、$U_{mz}$分别为 d、q、0 轴控制信号，I_{od}、I_{oq}、I_{oz}分别为滤波器输出 d、q、0 轴电流；ω为电网角频率；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

2　高阻故障问题分析

当逆变器线路发生高阻故障，且故障为单相接地时，逆变器负荷电压和电流会出现不平衡现象，如图 1 所示。

当发生单相接地的高阻故障时，以 A 相为例，复合序网如图 2 所示。图中：Z_{pL}、Z_{nL}、Z_{zL}分别为故障线路的正、负、零序阻抗；I_{Kap}、I_{Kan}、I_{Kaz}分别为正、负、零序故障电流。A 相电压从正极开始经过正、负、零序阻抗和 3 个接地电阻后回到负极。

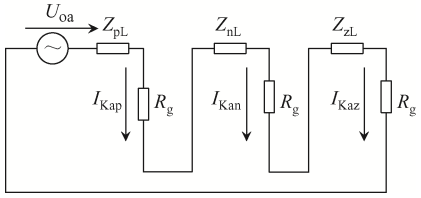


图 2　复合序网

Fig. 2 Composite-sequence network

由图 2 可得短路电压为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{Ka}}=\dfrac{3R_{\mathrm{g}}U_{\mathrm{oa}}}{Z_{\mathrm{pL}}+Z_{\mathrm{nL}}+Z_{\mathrm{zL}}+3R_{\mathrm{g}}} \\ U_{\mathrm{Kb}}=U_{\mathrm{ob}}-\dfrac{Z_{\mathrm{zL}}-Z_{\mathrm{pL}}}{Z_{\mathrm{pL}}+Z_{\mathrm{nL}}+Z_{\mathrm{zL}}+3R_{\mathrm{g}}}U_{\mathrm{oa}} \\ U_{\mathrm{Kc}}=U_{\mathrm{oc}}-\dfrac{Z_{\mathrm{zL}}-Z_{\mathrm{pL}}}{Z_{\mathrm{pL}}+Z_{\mathrm{nL}}+Z_{\mathrm{zL}}+3R_{\mathrm{g}}}U_{\mathrm{oa}} \end{cases} \tag{6}$$

式中，U_{oa}、U_{ob}、U_{oc}为三相输出电压。由式(6)可知，当逆变器线路出现单相接地高阻故障时，短路电压不相等，即故障点出现不平衡电压，导致逆变器输出电压和电流不平衡，出现负序和零序电流分量，从而造成电压畸变，降低电能质量[20-22]。

由于三桥臂逆变器中只有 dq 轴控制，可以控制负序分量，但不能加入零轴控制，即不能控制零序分量，因此，当逆变器线路出现高阻故障产生零序分量时，无法通过加入控制算法的方式抑制零序分量，而三相四桥臂逆变器可通过加入零轴控制实现零序分量抑制。因此，需要在零轴上加入容错控制算法来抑制高阻故障产生的零序分量。

3　基于残差生成器的高阻故障检测和容错控制方法

3.1　零轴容错控制方法

四桥臂逆变器的 dq 轴原控制器采用电压电流双闭环控制，零轴采用基于残差生成器的容错控制。当线路上发生单相接地高阻故障时，容错控制器能保证系统输出电压的电能质量，并且可通过残差分析的方法进行高阻故障检测。

采用模型匹配的方法实现零轴容错控制，如

图 3 所示。图中：$\boldsymbol{d}_z(s)$为零轴扰动量；$\boldsymbol{r}_z(s)$为零轴残差量，$\boldsymbol{r}_z(s)=[r_{I_{lz}} \quad r_{U_{oz}}]^T$，$r_{I_{lz}}$、$r_{U_{oz}}$分别为零轴电流残差、电压残差；$\boldsymbol{Q}_z(s)$为零轴容错控制器传递函数；$\boldsymbol{u}_{rz}(s)$为零轴补偿量，$\boldsymbol{u}_{rz}(s)=[\boldsymbol{u}_{rI_{lz}} \quad \boldsymbol{u}_{rU_{oz}}]^T$，$\boldsymbol{u}_{rI_{lz}}$、$\boldsymbol{u}_{rU_{oz}}$分别为零轴电流补偿量、电压补偿量；$\boldsymbol{y}_{ydz}(s)$、$\boldsymbol{y}_{pz}(s)$分别为扰动和补偿信号的输出信号。由图 3 可知，当控制目标 $\boldsymbol{z}_z(s)=0$ 时，$\boldsymbol{d}_z(s)$被完全补偿，即零序电流扰动被完全抵消，消除了高阻故障对输出电压的影响。

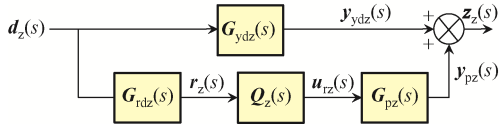


图 3 零轴容错控制

Fig. 3 Zero-axis fault-tolerant control

根据电路模型可得零轴补偿信号到输出传递函数 $\boldsymbol{G}_{pz}(s)$、零轴扰动到残差信号的传递函数 $\boldsymbol{G}_{rdz}(s)$、零轴扰动到输出的传递函数 $\boldsymbol{G}_{ydz}(s)$表达式分别为

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{pz}(s)/\mathrm{d}t=\boldsymbol{A}_{pz}\boldsymbol{x}_{pz}(s)+\boldsymbol{B}_{pz}u_{pz}(s) \\ \boldsymbol{y}_{pz}(s)=\boldsymbol{C}_{pz}\boldsymbol{x}_{pz}(s) \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{rdz}(s)/\mathrm{d}t=(\boldsymbol{A}_{pz}-\boldsymbol{L}_z\boldsymbol{C}_{pz})\boldsymbol{x}_{rdz}(s)+\boldsymbol{E}_{rdz}\boldsymbol{d}_z(s) \\ \boldsymbol{r}_z(s)=\boldsymbol{C}_{rdz}\boldsymbol{x}_{rdz}(s) \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{ydz}(s)/\mathrm{d}t=\boldsymbol{A}_{ydz}\boldsymbol{x}_{ydz}(s)+\boldsymbol{E}_{ydz}\boldsymbol{d}_z(s) \\ \boldsymbol{y}_{ydz}(s)=\boldsymbol{C}_{ydz}\boldsymbol{x}_{ydz}(s) \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{pz}=\begin{bmatrix} -r_L/L_f & -1/4L_f \\ 1/C_f & 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{B}_{pz}=\begin{bmatrix} 1/4L_f \\ 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{C}_{pz}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{pz}$、$\boldsymbol{u}_{pz}$、$\boldsymbol{y}_{pz}$分别为状态量、输入量、输出量，$\boldsymbol{x}_{pz}=[I_{lz} \quad U_{oz}]^T$、$u_{pz}=U_{iz}$、$\boldsymbol{y}_{pz}=[I_{lz} \quad U_{oz}]^T$；$\boldsymbol{x}_{rdz}$为状态量，$\boldsymbol{x}_{rdz}=[x_{rdzI} \quad x_{rdzU}]^T$，$x_{rdzI}$、$x_{rdzU}$分别为零轴电流、电压残差状态量；$\boldsymbol{L}_z$为零轴观测器增益矩阵；$\boldsymbol{C}_{rdz}=\boldsymbol{C}_{pz}$；$\boldsymbol{E}_{rdz}=[0 \quad -1/C_f]^T$；$\boldsymbol{A}_{ydz}=\boldsymbol{A}_{pz}$；$\boldsymbol{E}_{ydz}=\boldsymbol{E}_{rdz}$；$\boldsymbol{C}_{ydz}=\boldsymbol{C}_{pz}$。

被控对象的表达式为

$$\begin{bmatrix} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{rdz}(s)/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{ydz}(s)/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{pz}(s)/\mathrm{d}t \\ \hline \boldsymbol{z}_z(s) \\ \boldsymbol{y}_z(s) \end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c|cc} \boldsymbol{A}_z & \boldsymbol{B}_{z1} & \boldsymbol{B}_{z2} \\ \hline \boldsymbol{C}_{z1} & \boldsymbol{D}_{z11} & \boldsymbol{D}_{z12} \\ \boldsymbol{C}_{z2} & \boldsymbol{D}_{z21} & \boldsymbol{D}_{z22} \end{array}\right]\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{rdz}(s) \\ \boldsymbol{x}_{ydz}(s) \\ \boldsymbol{x}_{pz}(s) \\ \hline \boldsymbol{d}_z(s) \\ \boldsymbol{u}_z(s) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_z=\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{rdz} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{A}_{ydz} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{A}_{pz} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{B}_{z1}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{rdz} \\ \boldsymbol{B}_{ydz} \\ 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}_{z2}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \boldsymbol{B}_{pz} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{C}_{z1}=\begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{C}_{ydz} \\ \boldsymbol{C}_{pz} \end{bmatrix}^T,\ \boldsymbol{C}_{z2}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{rdz} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T,\ \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_{z11} & \boldsymbol{D}_{z12} \\ \boldsymbol{D}_{z21} & \boldsymbol{D}_{z22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{rdz}=\boldsymbol{A}_{pz}-\boldsymbol{L}_z\boldsymbol{C}_{pz}$；$\boldsymbol{E}_{ydz}=\boldsymbol{E}_{rdz}=\boldsymbol{B}_{rdz}=\boldsymbol{B}_{ydz}$；$\boldsymbol{y}_z(s)$为输出，$\boldsymbol{y}_z(s)=\boldsymbol{r}_z(s)$；$\boldsymbol{u}_z(s)$为输入，$\boldsymbol{u}_z(s)=\boldsymbol{u}_{rz}(s)$。

$\boldsymbol{Q}_z(s)$的表达式为

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{Q_z}/\mathrm{d}t=\boldsymbol{A}_{Q_z}\boldsymbol{x}_{Q_z}+\boldsymbol{B}_{Q_z}\boldsymbol{u}_{Q_z} \\ \boldsymbol{y}_{Q_z}=\boldsymbol{C}_{Q_z}\boldsymbol{x}_{Q_z}+\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{u}_{Q_z} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{Q_z}$为状态量；$\boldsymbol{A}_{Q_z}$、$\boldsymbol{B}_{Q_z}$、$\boldsymbol{C}_{Q_z}$、$\boldsymbol{D}_{Q_z}$为系数矩阵；$\boldsymbol{u}_{Q_z}$为输入量；$\boldsymbol{y}_{Q_z}$为输出量。结合式(11)和式(13)可得

$$\begin{bmatrix} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{cz}(s)/\mathrm{d}t \\ \boldsymbol{z}_z(s) \end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{A}_{cz} & \boldsymbol{B}_{cz} \\ \hline \boldsymbol{C}_{cz} & \boldsymbol{D}_{cz} \end{array}\right]\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{cz}(s) \\ \boldsymbol{z}_z(s) \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{cz}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_z+\boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2} & \boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{C}_{Q_z} \\ \boldsymbol{B}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2} & \boldsymbol{A}_{Q_z} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{B}_{cz}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{z1}+\boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{D}_{z21} \\ \boldsymbol{B}_{Q_z}\boldsymbol{D}_{z21} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{C}_{cz}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{z1}+\boldsymbol{D}_{z12}\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2} & \boldsymbol{D}_{z12}\boldsymbol{C}_{Q_z} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{D}_{cl}=\boldsymbol{D}_{z11}+\boldsymbol{D}_{z12}\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{D}_{z21} \end{cases} \tag{15}$$

引入对称正定矩阵 $\boldsymbol{X}$，使得

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}^T\boldsymbol{X}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{C}^T \\ \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{X} & -\gamma\boldsymbol{I} & \boldsymbol{D}^T \\ \boldsymbol{C} & \boldsymbol{D} & -\gamma\boldsymbol{I} \end{bmatrix}<0 \tag{16}$$

式中，γ 为给定的正实数。由此可得 $\boldsymbol{Q}_z(s)$为

$$\boldsymbol{Q}_z(s)=\min\left\|\boldsymbol{C}_{cz}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_{cz})^{-1}\boldsymbol{B}_{cz}+\boldsymbol{D}_{cz}\right\|_{\infty} \tag{17}$$

$\boldsymbol{X}>0$ 需满足

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_z\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{A}_z^{\mathrm{T}}+(\boldsymbol{B}_{z2}\hat{\boldsymbol{C}})^{\mathrm{T}} & \hat{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{T}}+(\boldsymbol{A}_z+\boldsymbol{B}_{z2}\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{C}_{z2}) & \boldsymbol{B}_{z1}+\boldsymbol{B}_{z2}\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{D}_{z21} & (\boldsymbol{C}_{z1}\boldsymbol{R}+\boldsymbol{D}_{z12}\hat{\boldsymbol{C}})^{\mathrm{T}}\\ * & \boldsymbol{A}_z^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}_z+\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{C}_{z2}+(\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{C}_{z2})^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{S}\boldsymbol{B}_{z1}+\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{D}_{z21} & (\boldsymbol{C}_{z1}+\boldsymbol{D}_{z12}\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{C}_{z2})^{\mathrm{T}}\\ * & * & -\gamma\boldsymbol{I} & (\boldsymbol{D}_{z11}+\boldsymbol{D}_{z12}\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{D}_{z21})^{\mathrm{T}}\\ * & * & * & -\gamma\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0 \tag{19}$$

式中：*表示由矩阵对称性得到的矩阵块；$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{S}$ 为正定矩阵。由 $\boldsymbol{X}>0$ 可得$[\boldsymbol{R}\ \boldsymbol{I};\ \boldsymbol{I}\ \boldsymbol{S}]>0$。为避免求解式(19)时可行性解的矩阵接近奇异，加入约束条件$[\boldsymbol{S}\ \beta\boldsymbol{I};\ \beta\boldsymbol{I}\ \boldsymbol{R}]>0$，$\beta$ 为一常值。一组可行解为 $\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{S}$，$\hat{\boldsymbol{A}}$、$\hat{\boldsymbol{B}}$、$\hat{\boldsymbol{C}}$、$\hat{\boldsymbol{D}}$。将 $\boldsymbol{I}-\boldsymbol{R}\boldsymbol{S}$ 的奇异值分解得到 $\boldsymbol{H}$，$\boldsymbol{J}$。零轴容错控制器参数为

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_{Q_z}=\boldsymbol{J}^{-1}\left[\hat{\boldsymbol{A}}-\boldsymbol{S}(\boldsymbol{A}_z+\boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2})\boldsymbol{R}\right](\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})^{-1}-\\ \qquad\boldsymbol{B}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})^{-1}-\boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{S}\boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{C}_{Q_z}\\ \boldsymbol{B}_{Q_z}=\boldsymbol{J}^{-1}(\hat{\boldsymbol{B}}-\boldsymbol{S}\boldsymbol{B}_{z2}\boldsymbol{D}_{Q_z})\\ \boldsymbol{C}_{Q_z}=(\hat{\boldsymbol{C}}-\boldsymbol{D}_{Q_z}\boldsymbol{C}_{z2}\boldsymbol{R})(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})^{-1},\ \ \boldsymbol{D}_{Q_z}=\hat{\boldsymbol{D}}\end{cases} \tag{20}$$

3.2　高阻故障检测技术

当线路发生高阻故障时，系统电压的零序分量在零轴上表现为 1 倍工频扰动。因此可以将残差信号通过巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器滤出 1 倍工频信号，并依据该信号大小判断线路是否发生了高阻故障。巴特沃斯带通滤波器表达式为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{cz}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{cz} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{B}_{cz} & \boldsymbol{C}_{cz}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{B}_{cz}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} & -\gamma\boldsymbol{I} & \boldsymbol{D}_{cz}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{C}_{cz} & \boldsymbol{D}_{cz} & -\gamma\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0 \tag{18}$$

将式(18)线性化，得

$$\begin{cases}\boldsymbol{H}(s)=\dfrac{2\cos\theta_{k_b}\omega_{n_b}s}{\prod\limits_{k_b=1}^{2/n_b}\left[s^2+2\cos\theta_{k_b}\omega_{n_b}s+\omega_{n_b}^2\right]}\\ \theta_{k_b}=\dfrac{(2k_b-1)(180^\circ-2\theta)}{2(n_b-1)}\\ k_b=\begin{cases}1,2,\cdots,(N_b+1)/2 & N_b\text{为奇数}\\ 1,2,\cdots,N_b/2 & N_b\text{为偶数}\end{cases}\end{cases} \tag{21}$$

式中：n_b 为巴特沃斯带通滤波器阶数；ω_{n_b} 为滤波器截止频率；θ_{k_b} 为在复频域的巴特沃斯圆周上的主导极点与虚轴夹角；k_b 为极点；N_b 为系统阶数。计算 1 倍工频扰动的零轴电压残差值的峰峰值，将其与设定阈值进行比较，从而检测是否发生高阻故障。当峰值大于阈值时，证明有高阻故障发生，否则无故障发生。基于残差的高阻故障检测与容错控制策略如图 4 所示。可以看出，零轴残差生成器通过逆变桥输出的零轴电压和滤波电容零轴电压生成零轴残差，经过巴特沃斯带通滤波器得到扰动残差信号，计算其峰峰值，然后通过残差分析进行高

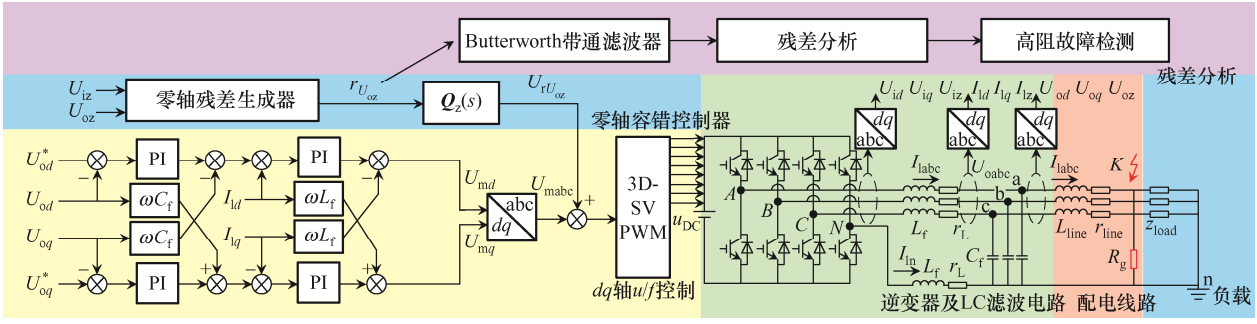


图 4　基于残差生成器的高阻故障检测与容错控制策略

Fig. 4 Residual generator-based high-resistance fault detection and fault-tolerant control strategy

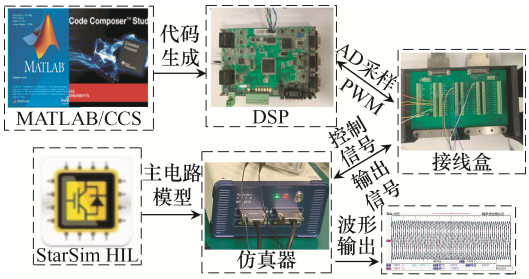
阻故障检测，同时将零轴残差驱动容错控制器得到的电压补偿信号和双闭环输出的控制信号叠加，共同控制四桥臂逆变器，实现不平衡电压补偿。

此外，高阻故障中常出现间歇性电弧的导通和

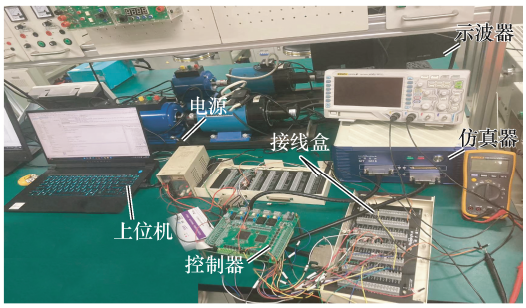
重燃，呈现出高次谐波的特征，导致波形非线性畸变。为了区分高阻故障和三相不平衡，对零序电流进行快速傅里叶变换分析，提取其频域特征。高阻故障的频域特征图中含有高次谐波，而三相不平衡的频域特征图中没有高次谐波。

4 实验验证

实验硬件在环仿真平台如图 5 所示，由 MATLAB、CCS、StarSim HIL 等软件，以及控制器和 PXI 平台等硬件组成，其中，控制程序写入控制器，四桥臂逆变器电路搭建于 PXI 平台。实验参数参照三相四桥臂逆变器实际产品选取，见表 1。



(a) 结构图



(b) 实验样机

图 5 硬件在环仿真平台示例

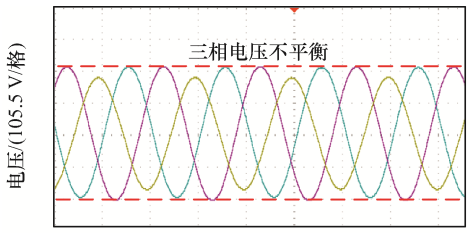
Fig. 5 Example of hardware-in-the-loop simulation platform

表 1 实验参数

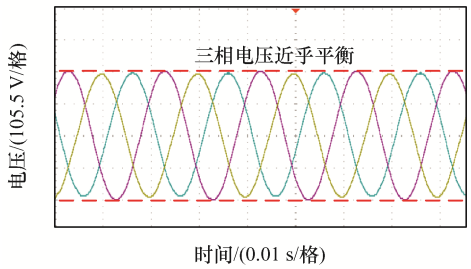
Tab. 1 Experimental parameters

参数	数值
滤波电感/mH	5
滤波电容/μF	210
滤波电阻/Ω	0.01
线路电感/mH	0.264
线路电阻/Ω	0.642
电压环比例系数	10
电压环积分系数	100
电流环比例系数	10

假设在某一时刻逆变器线路发生单相接地高阻故障，R_g=50 Ω。加入容错控制前、后四桥臂逆变器输出电压和零轴电压残差值的峰峰值分别如图 6 和图 7 所示，加入容错控制前、后电压的不平衡度见表 2。由图 6 可知，当线路发生单相接地高阻故障后，逆变器输出电压三相不平衡，在加入零



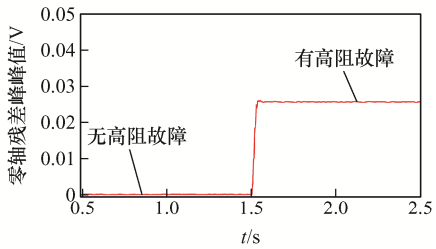
(a) 容错前电压



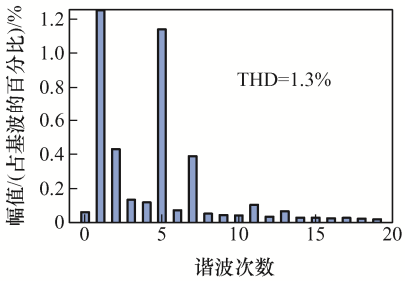
(b) 容错后电压

图 6 容错控制前、后输出电压

Fig. 6 Output voltage before and after fault-tolerant control



(a) 零轴电压残差峰峰值



(b) 零序电流的THD

图 7 高阻故障检测

Fig. 7 High-resistance fault detection

表 2　电压不平衡度

Tab. 2 Voltage imbalance degree

是否加入容错控制	不平衡度/%
不加入	4.4
加入	1.5

轴 $\boldsymbol{Q}_z(s)$后三相电压近乎平衡，提升了系统的电能质量。由图 7 可知，当发生单相接地高阻故障时，零轴电压残差峰峰值从 0 V 变为 0.026 V，将阈值设定为 0.005 V，零序电流中存在的总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)为 1.3%，可判断线路发生了高阻故障。因此，本文所提方法可精确检测高阻故障，并对高阻故障带来的影响具有良好的抑制效果。

5　结语

本文以三相四桥臂逆变电路为研究对象，提出了一种基于残差生成器的零轴高阻故障检测和容错控制方法。首先研究了线路单相接地高阻故障对四桥臂逆变器输出电压电流的影响；接着从零轴扰动对消的角度设计了零轴容错控制器，并通过线性矩阵不等式法求解，使得逆变器输出电压达到平衡，提升电压的电能质量；最后利用零轴电压残差峰峰值和设定阈值进行比较，实现线路单相接地高阻故障的精准检测。

参考文献：

[1] 王一妹, 李俊领, 曾杰, 等. 计及不可调度 DG 的孤岛串级交流微电网功率控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 298-306.
Wang Yimei, Li Junling, Zeng Jie, et al. Power control method for island cascaded AC microgrid including non-dispatchable DG [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 298-306. (in Chinese)

[2] Wang Bo, Zhang Cuo, Li Chaojie, et al. Transactive energy sharing in a microgrid via an enhanced distributed adaptive robust optimization approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2279-2293.

[3] Li Hui, Ren Zhouyang, Trivedi A, et al. A noncooperative game-based approach for microgrid planning considering existing interconnected and clustered microgrids on an island [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2064-2078.

[4] 卢军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191. (in Chinese)

[5] 刘琨, 崔鑫, 王宾, 等. 配电线路经生物体高阻接地故障特性对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (22): 67-74.
Liu Kun, Cui Xin, Wang Bin, et al. Comparative analysis of high impedance grounding fault characteristics via an organism in distribution lines [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 67-74. (in Chinese)

[6] Hu Rongguang, Wang Jiabin, Mills A R, et al. Detection and classification of turn fault and high resistance connection fault in permanent magnet machines based on zero sequence voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1922-1933.

[7] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
Zhou Yu, Tang Tao, Zeng Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120. (in Chinese)

[8] Li Jie, Liu Yinliang, Li Chengxin, et al. An FTU-based method for locating single-phase high-impedance faults using transient zero-sequence admittance in resonant grounding systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 913-922.

[9] 柯亮, 李波, 廖凯, 等. 基于XGBoost的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 88-98.
Ke Liang, Li Bo, Liao Kai, et al. High impedance fault detection method in a distribution network based on XGBoost [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 88-98. (in Chinese)

[10] 韩兆儒, 石访, 张恒旭, 等. 考虑电容投切扰动的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 180-191.
Han Zhaoru, Shi Fang, Zhang Hengxu, et al. High-impedance grounding fault detection method for distribution network considering capacitor switching disturbance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 180-191. (in Chinese)

[11] 王鹏玮, 徐丙垠, 王超, 等. 基于故障相电压与零序电流相位比较的中性点不接地系统高阻接地故障保护方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 148-156.
Wang Pengwei, Xu Bingyin, Wang Chao, et al. Protection method for high-impedance grounding fault in neutral isolated system based on comparative phase analysis of fault phase voltage and zero-sequence current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 148-156. (in Chinese)

[12] Mu Dalin, Lin Sheng, He Pinggang, et al. An improved method of traveling wave protection for DC lines based on the compensation of line-mode fault voltage [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1720-1730.

[13] Lin Sheng, Liu Lei, Sun Peiyao, et al. Fault location algorithm based on characteristic- harmonic measured impedance for HVdc grounding electrode lines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9578-9585.

[14] 张艳峰, 杨锡运, 徐恩慧. 漂浮式海上风电机组无模型自适应容错控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 467-477.
Zhang Yanfeng, Yang Xiyun, Xu Enhui. Model-free adaptive fault-tolerant control strategy for floating offshore wind turbines [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 467-477. (in Chinese)

[15] Shi Pengchuan, Wang Xueqing, Meng Xin, et al. Adaptive fault-tolerant control for open-circuit faults in dual three-phase PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3676-3688.

[16] Jiang Xuefeng, Wei Zhijian, Xue Rongze, et al. Dual-mode fault-tolerant control strategy for dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 12690-12701.

[17] 魏金成, 杨鑫, 邱晓初, 等. 三相四桥臂混合五电平逆变器及其 3D-SVPWM 算法[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 92-100.
Wei Jincheng, Yang Xin, Qiu Xiaochu, et al. Three-phase four-leg hybrid five-level inverter and its 3D-SVPWM algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 92-100. (in Chinese)

[18] Sun Yuan, Chen Jie, Qiu Ruichang, et al. Open-circuit, current sensor fault diagnosis of three-phase four-wire inverters based on Fourier fitting [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3522813.

[19] 曹天旭, 安浩澎, 龙波. 一种基于节点比较法的三相四桥臂并网逆变器模型预测控制方法[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 1-9.
Cao Tianxu, An Haopeng, Long Bo. Node comparison method based model predictive control method for three-phase four-leg grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 1-9. (in Chinese)

[20] Jia Ke, Feng Tao, Zhao Qijuan, et al. High frequency transient sparse measurement-based fault location for complex DC distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 312-322.

[21] Zamani M, Haghjoo F, Samimi M H, et al. A simple magnetic-flux-based method for localizing high-resistance stator ground faults in synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5253-5262.

[22] 史鸿飞, 邓丰, 钟航, 等. 基于暂态时.频特征差异的配电网高阻接地故障识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6455-6469.
Shi Hongfei, Deng Feng, Zhong Hang, et al. Identification method of high impedance fault in distribution network based on transient time-frequency characteristic difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6455-6469. (in Chinese)



马原

作者简介：

马原(1998—)，男，硕士，工程师。研究方向：主动配网的运行和分析，配网状态估计。E-mail：ma.yuan.cn@outlook.com。

刘佳林(1992—)，男，硕士，工程师。研究方向：有源配电网的风险评估分析，电能质量分析与控制。E-mail：liu.jialin.a@outlook.com。

陈璨(1988—)，女，博士，高级工程师。研究方向：新能源电网分析，有源配电网风险评估。E-mail：wscc0621@163.com。

徐广达(1994—)，女，硕士，工程师。研究方向：信息物理系统，配电网和电力物联网。E-mail：xgd@sdu.edu.cn。

马鑫晟(1986—)，男，硕士，工程师。研究方向：无功功率，过电压分析，有源配电网的风险评估。E-mail：t_mxs@163.com。

张赛(1999—)，男，通信作者，硕士。研究方向：智能电网。E-mail：296318987@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)