文章编号:

基于分数阶模型预测控制的有源消弧技术研究

张一森[1]，薛 强[1]，刘 强[2]，张 恒[2]，刘玉芝[1]

（1.石家庄铁道大学，河北石家庄 050043；
2.国网河北省电力有限公司邢台供电分公司，河北邢台 054000）

摘 要：针对新型电力系统中电力电子设备比例上升导致非线性响应加剧，单相接地故障电流谐波分量显著增大，传统消弧方法难以有效抑制电弧的问题，本文提出一种基于分数阶模型预测的消弧控制方法。首先，将双级联 H 桥中的传统电感替换为不同阶次的分数阶电感；其次，采用对应阶次的模型预测控制方法，以电流跟踪误差最小为原则对故障残流进行补偿，从而实现有效消弧。最后，通过硬件在环实验验证了该方法的性能。结果表明，采用适当阶次的分数阶模型预测控制进行消弧，在响应速度和消弧效果上更具优越性。将分数阶微积分理论与有源消弧逆变器及其控制相融合，可提升响应速度并降低故障电流，为电力电子化电网故障抑制提供参考。

关键词：电气工程；有源消弧技术；分数阶模型预测控制；双级联 H 桥；响应速度；消弧效果
中图分类号：TN470.40 **文献标志码**：A

Research on Active Arc Suppression Technology Based on Fractional-Order Model Predictive Control

ZHANG Yisen[1]，XUE Qiang[1]，LIU Qiang[2]，ZHANG Heng[2]，LIU Yuzi[1]

（1.Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China ;
2.State Grid Xingtai Electric Power Supply Company, Xingtai, 054000, China）

Abstract: In response to the problem that the proportion of power electronic devices in the new power system is increasing, leading to intensified nonlinear responses and a significant increase in harmonic components of single-phase grounding fault currents, and traditional arc suppression methods are difficult to effectively suppress the arc, this paper proposes an arc suppression control method based on fractional-order model prediction. Firstly, the traditional inductors in the double-cascaded H-bridge are replaced with fractional-order inductors of different orders. Secondly, the corresponding order model predictive control method is adopted to compensate for the fault residual current based on the principle of minimizing the current tracking error, thereby achieving effective arc suppression. Finally, the performance of the method is verified through hardware-in-the-loop experiments. The results show that using the appropriate order fractional-order model predictive control for arc suppression has superior performance in response speed and arc suppression effect. The integration of fractional calculus theory with active arc suppression inverters and its control can improve the response speed and reduce the fault current, providing a reference for fault suppression in power electronicized power grids.

Key words: Electrical Engineering; Active Arc Suppression Technology; Fractional Order Model Predictive Control; Dual-Linked H-bridge; Response Speed; Arc Suppression Effect

针对中压配电网中高发的单相接地故障，传统谐振接地系统难以有效抑制新型电力系统因高比例电力电子设备引起的故障电流谐波分量，严重影响了消弧效果与系统安全运行。有源消弧技术为补偿故障电流中的谐波分量提供了有效途径，在有源消弧逆变器应用中，当前主流方法是使用整数阶模型[1]对系统中的动态元件（如电感）进行描述。然而，研究表明这类元件实际具备分数阶特性[2]，其行为用传统整数阶模型表征时

收稿日期：2025.7.16；修回日期：2025.12.19；责任编辑：冯民
基金项目：国家自然科学青年基金（62303332），国家自然科学基金面上项目(12072203)，国网河北省电力有限公司科技项目（kjcb2024-016）
作者简介：张一森（2001—），男，汉族，河北廊坊人，硕士研究生，主要从事有源消弧、电力电子技术方面的研究。
通讯作者：刘玉芝，教授。E-mail：610659996@qq.com

会出现相位偏移与不同的增益幅值，进而制约消弧效果，因此需要考虑分数阶模型以提高消弧效果。

现有研究在直流变换与逆变控制中应用分数阶理论，已展现出提升控制精度与动态性能的潜力。在直流电源拓扑结构及控制中以电压调节型电路最为典型，如降压电路控制策略[3]、升压电路[4]的响应优化以及具备宽范围调压能力的复合型升降压电路[5]等；在逆变器应用方面，近年来也有所突破，文献[6]在分数阶逆变系统的器件级仿真中引入分数阶 PI^{λ} 控制器提高控制效果；文献[7]-[10]也通过引入分数阶控制，以获得更好的谐波抑制能力和动态性能。

因此,本文为突破现有整数阶模型预测控制精度受限的问题，建立分数阶电感模型以准确描述系统特性，并设计对应阶次的分数阶模型预测控制算法，以实现对故障残流的快速、精确补偿。最后，通过硬件在环实验验证所提方法的有效性。

1 消弧机理分析及拓扑控制设计

1.1 配电网有源消弧机理分析

本文采用主辅式单相接地故障电流全补偿策略，由消弧线圈与级联 H 桥多电平逆变器的并联组合消弧。当配电网发生单相接地故障时，消弧线圈作为主补偿单元，对故障电流的工频容性分量进行补偿，级联 H 桥逆变器作为辅助补偿单元，消除容性谐波分量，以达到故障电流的全补偿目的。系统结构[1]如图 1 所示，其中：$\dot{E}_A$、$\dot{E}_B$、$\dot{E}_C$ 分别为配网的三相工频电源电压，Z_A、Z_B、Z_C 分别为配电网在工频条件下的三相线路阻抗，Y_A、Y_B、Y_C 分别为配电网在工频条件下的三相对地导纳，R_d 为短路接地阻抗，L 为消弧线圈等效电感，Y_L 为消弧线圈等效导纳，$\dot{I}_{in}$ 级联 H 桥逆变器的补偿注入电流。

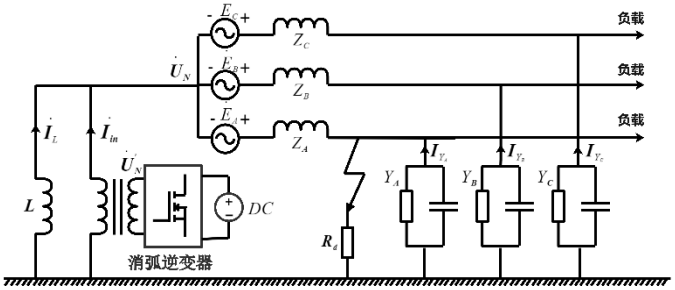

图 1 配电网单相接地故障有源消弧示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Active Arc Suppression for Single-Phase Ground Fault in Distribution Network

为进一步分析有源消弧机理，分别从工频分量和谐波分量两方面进行分析。

为简化计算，忽略线路阻抗后的基波等效电路如图 2 所示，并由图 2 得：

$$\dot{I}_{inp} = \dot{U}_N Y_L + (\dot{E}_A + \dot{U}_N)(Y_A + Y_d) + (\dot{E}_B + \dot{U}_N)Y_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_N)Y_C \tag{1}$$

为实现工频接地电流为零，故障相工频电压也应为零，即 $\dot{U}_N = -\dot{E}_A$，将此边界条件代入式(1)，推导得到消弧逆变器工频补偿电流为：

$$I_{inp} = -\dot{E}_A Y_L + (\dot{E}_B - \dot{E}_A)Y_B + (\dot{E}_C - \dot{E}_A)Y_C \tag{2}$$

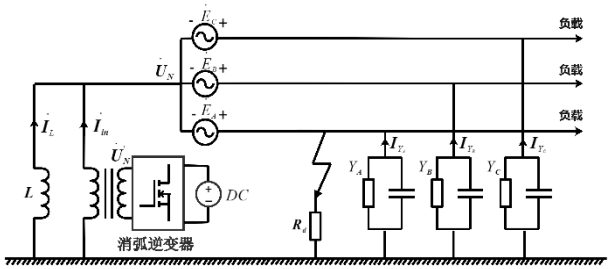

图 2 单相接地故障下工频分量有源消弧示意图

Fig.2 Schematic diagram of active arc suppression for fundamental component in single-phase grounding fault

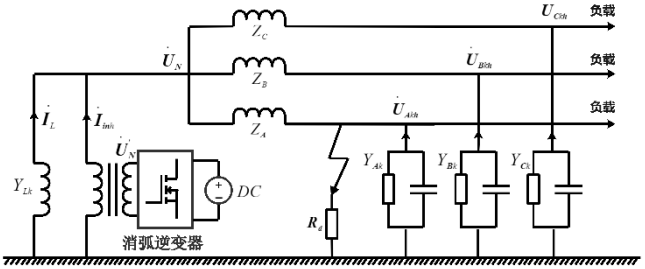

图 3 单相接地故障下谐波分量有源消弧示意图

Fig.3 Schematic diagram of active harmonic component elimination for single-phase grounding faults

对于配网中的谐波分量，分别使用 $\dot{U}_{Akh}$、$\dot{U}_{Bkh}$、$\dot{U}_{Ckh}$ 表示系统的 k 次谐波电压，采用瞬时无功功率法提取，$\dot{U}_{Nkh}$ 为中性点的 k 次谐波电压，Y_{Ak}、Y_{Bk}、Y_{Ck} 分别为 k 次谐波下的线路对地导纳，Y_{Lk} 为 k 次谐波下的消弧线圈导纳，谐波等效原理图如图 3 所示，并可得谐波补偿电流为：

$$\dot{I}_{inh} = \sum_{k=2}^{n} [\dot{U}_{Nkh} Y_{Lk} + \dot{U}_{Akh}(Y_{Ak} + Y_{dk}) + \dot{U}_{Bkh} Y_{Bk} + \dot{U}_{Ckh} Y_{Ck}] \tag{3}$$

其中， n 为最高次谐波的次数。

谐波接地故障电流消零条件为 $\dot{U}_{Akh}=0$，忽略 Z_{ke}，将消零条件代入式(3)可得消弧逆变器谐波补偿电流为：

$$\dot{I}_{inh}=\sum_{k=2}^{n}[\dot{U}_{Bkh}Y_{Bk}+\dot{U}_{Ckh}Y_{Ck}] \tag{4}$$

将以上工频补偿电流与谐波补偿电流叠加，则消弧逆变器总注入电流为：

$$\dot{I}_{in}=-\dot{E}_{A}Y_{L}+(\dot{E}_{B}-\dot{E}_{A})Y_{B}+(\dot{E}_{C}-\dot{E}_{A})Y_{C}+\sum_{k=2}^{n}[\dot{U}_{Bkh}Y_{Bk}+\dot{U}_{Ckh}Y_{Ck}] \tag{5}$$

1.2 谐波检测原理

针对电力系统所含的谐波分量，由上文分析及图 3 可知，需得到 $\dot{U}_{Akh}$、$\dot{U}_{Bkh}$ 及 $\dot{U}_{Ckh}$，从而通过式(3)得到谐波参考补偿电流 $\dot{I}_{inh}$，本文采用基于单相电路瞬时功率原理的单相谐波检测法[11]进行检测，从而获得谐波补偿参考电流，其检测原理如图 5 所示。其中，$u_s(t)$ 为检测电压，$u_h(t)$ 为通过该算法得到的谐波检测电压，即相应的 $\dot{U}_{Akh}$、$\dot{U}_{Bkh}$ 及 $\dot{U}_{Ckh}$。

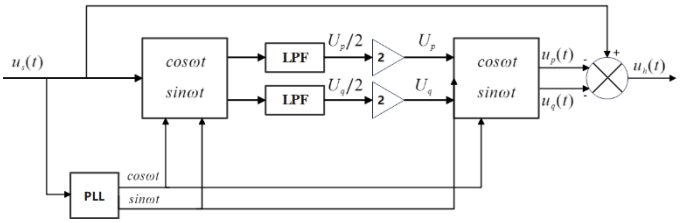

图 4 基于单相瞬时功率原理的单相谐波检测原理图

Fig.4 Schematic diagram of single-phase harmonic detection based on the principle of single-phase instantaneous power

1.3 有源消弧系统结构及拓扑选择

本文采用中性点并联型混合消弧结构，由消弧线圈和消弧逆变器两个单元构成。其中，消弧线圈直接接入中性点-大地回路，主要导补偿工频容性故障电流分量；级联 H 桥消弧逆变器经升压变压器耦合至中性点，补偿残存的工频有功分量及容性谐波分量。该并联型混合消弧结构可快速补偿故障电流，并且极大程度上降低了消弧逆变器的容量，消弧结构如上图 4 所示：

该消弧结构的消弧逆变器拓采用模块化级联 H 桥结构，由多个 H 桥功率单元串联构成，单个功率单元如图 5 所示。

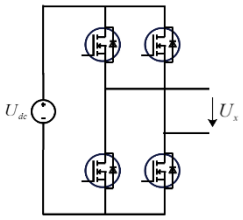

图 5 H 桥功率单元

Fig.5 H-bridge power unit

单个功率单元由四个开关构成两个桥臂。桥臂状态为 0 时表示下桥臂导通、上桥臂关断；状态为 1 则表示上桥臂导通、下桥臂关断。第 x 个功率单元的输出电压 U_x 取决于其开关状态，可表示为：

$$U_x=U_{dc}(s_{x1}-s_{x2}) \tag{6}$$

其中，U_{dc} 为直流侧电压，s_{x1} 和 s_{x2} 分别为第 x 个功率单元的左、右桥臂开关状态。表 1 列出了单个功率单元在不同开关状态组合下的输出电压值。

本文采用双级联 H 桥作为基础拓扑，其结构见图 6 所示。

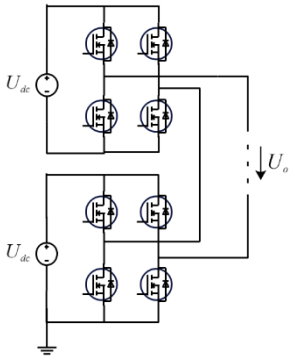

图 6 双级联H桥拓扑

Fig.6 Double-Linked H-bridge topology

根据式(6)，该消弧逆变器的交流侧总输出电压为：

$$U_o=\sum_{x=1}^{2}U_x=\sum_{x=1}^{2}U_{dc}(s_{x1}-s_{x2}) \tag{7}$$

表 1 H 桥功率单元开关状态表

Tab.1 H-bridge power unit switch status table

开关状态组别	桥臂 1 状态s_1	桥臂 2 状态s_2	电压输出值
1	0	0	0
2	1	0	U_{dc}
3	1	1	0
4	0	1	$-U_{dc}$

1.4 拓扑开关状态建立

理想情况下，开关状态切换是瞬间完成，无过渡状态。但实际开关动作（开通或关断）均存在短暂时间，这会扰动输出电压并产生误差。双级联 H 桥多电平逆变器理论上共有 16 种开关状态组合。在忽略过渡状态后，表 2 列出了实际可用的稳态开关组合及其对应的输出电平。

表 2 H 桥功率单元开关状态表

Tab.2 H-bridge power unit switch status table

开关状态组合	单桥臂开关状态				输出电平$u_o(t)$
	s_1	s_2	s_3	s_4	
S_0	0	0	0	0	0
S_1	1	0	0	0	U_{dc}
S_2	1	0	1	0	$2U_{dc}$
S_3	0	1	0	0	$-U_{dc}$
S_4	0	1	0	1	$-2U_{dc}$

1.5 分数阶级联H桥建模

图 7 所示的部分是分数阶电感近似电路。依据文献[12]，采用基于分抗链及优化的 Oustaloup 滤波器的分数阶微积分方法[13]，可以构建分数阶电感与电容的等效电路模型，如图 7 所展示，其电压与电流之间的关系如式：

$$u_L = L_\alpha \frac{d^\alpha i_L}{dt^\alpha} \tag{8}$$

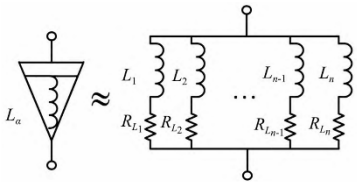

图 7 分数阶电感近似电路

Fig.7 Fractional-order inductor approximate circuit

结合图 1 和图 6，其中消弧逆变器通过升压变压器接于电源中性点，则消弧逆变器的拓扑输出原理图如图 8 所示：

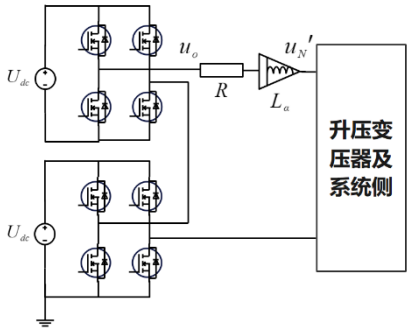

图 8 消弧逆变器的拓扑输出原理图

Fig.8 Topology output schematic diagram of the arc suppression inverter

由上图 8 可得：

$$L_\alpha \frac{\mathrm{d}^\alpha i(t)}{\mathrm{d}t^\alpha} + Ri(t) = u_o(t) - u_N^{'}(t) \tag{9}$$

其中，$u_o(t)$ 为级联 H 桥桥臂侧输出电压，$u_N^{'}(t)$ 为变压器一次侧输出电压值，$u_N^{'}(t) = n \cdot u_N(t)$，$n$ 为变压器变比，$u_N(t)$ 为中性点电压。

对式(9)进行分数阶 Laplace 变换得到：

$$L_\alpha \mathrm{s}^\alpha i(s) + Ri(s) = u_o(s) - u_N^{'}(s) \tag{10}$$

令中心点电压扰动 $u_N^{'}(s) = 0$，则输出电压到输出电流的传递函数如下式所示：

$$G_{VI}(s) = \frac{i(s)}{u_o(s)} \Big|_{u_N^{'}(s)=0} = \frac{1}{L_\alpha \mathrm{s}^\alpha + R} \tag{11}$$

式(11)表明，级联 H 桥逆变器的分数阶建模具有多参数敏感性特征。其系统特性不仅受等效电阻、滤波

电感（分数阶）的结构参数的影响，元件阶次值的不同也会显著改变模型特性。此外，当分数阶次 $\alpha = 1$ 时，该分数阶模型的运算结果与传统整数阶模型呈现出完全一致性。这一现象揭示出，整数阶建模方法本质上是分数阶理论框架下的特例情况，从数学本质上验证了分数阶建模方法具有更广泛的适用性。

下图 9 展示了不同阶次参数下 $G_{VI}(s)$ 的幅频相频响应特性。Bode 图分析表明，分数阶元件阶次值的调整会引起 3 个频段的差异化响应：在低频区域，系统幅相特性对阶次变化呈现强鲁棒性，其增益曲线与相位轨迹均无明显波动；进入中频带后，随着电感阶次值的降低，系统表现出幅频带宽扩展现象，同时相位范围产生动态偏移；当频率提升至高频域时，阶次降低将导致幅频响应衰减速率下降，对应相位滞后量也有所缩减；整体来说，随阶数下降，其幅值增益不断上升，相位滞后程度不断下降。

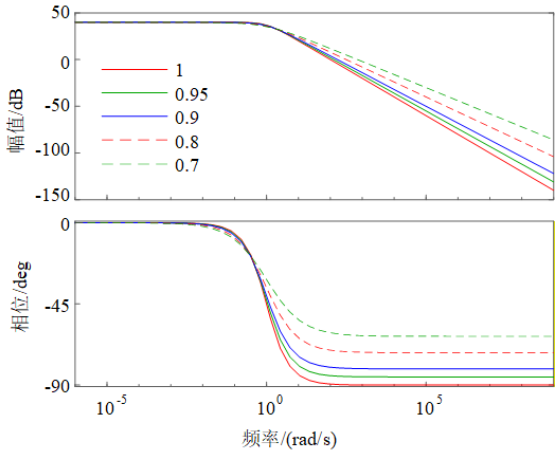

图 9 输入-输出伯德图

Fig.9 Input voltage - output voltage Bode plot

1.6 分数阶模型预测控制理论

分数阶模型预测控制（Fractional Order Model Predictive Control, FOMPC）的核心原理是利用系统关键变量的分数阶导数或积分的短期变化，依据预设的最优化准则，来确定最佳控制策略。这种控制策略主要基于控制系统的分数阶离散时间模型来预测系统未来的输出状态。

本文提出的 FOMPC 系统通过实时采集当前时刻的逆变器输出电流和电网电压，利用瞬时无功功率算法获取相应的补偿电流参考值，进而基于分数阶微积分原理预测下一时刻可能的逆变器输出电流。同时，考虑到跟踪参考电流误差的最小化，系统利用预设的最优目标函数进行优化评估。最终，选取使目标函数最优的输出状态，控制逆变器开关状态的切换，以达到有效熄弧的目的。下一个时刻电流 $i(t_{k+1})$ 随开关状态组合 $S(t_k)$ 的关系如图 10 所示。其中，i^* 为参考电流，i 为不同开关状态组合下的实际输出电流。

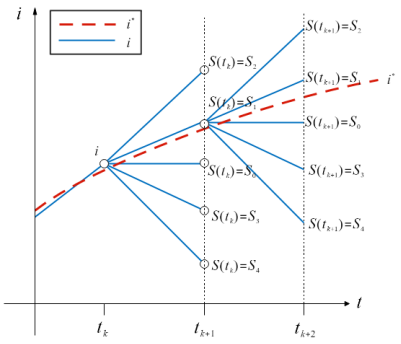

图 10 下一个时刻电流 $i(t_{k+1})$ 随开关状态组合 $u(t_k)$ 的关系图

Fig.10 The next diagram showing the relationship of current with the combination of switch states

1.7 目标函数设计

构建目标函数的目的是在可选择的开关状态中选出能够使未来时刻逆变器输出与误差最小的开关状态，对于分数阶模型预测控制（FOMPC）系统而言，选择合适的目标函数至关重要。在本系统中，逆变器控制的目标是使多电平逆变器输出的电流与参考补偿电流之间的误差最小化，以达到息弧的目的[14]。因此，可以定义如下目标函数：

$$J = (i^*(t_{k+1}) - i(t_{k+1}))^2 \tag{12}$$

其中，$i^*(t_{k+1})$ 和 $i(t_{k+1})$ 分别代表 t_{k+1} 时刻的参考补偿电流和实际输出电流。

1.8 分数阶预测模型建立

由上图 8 可得：

$$L_\alpha \frac{\mathrm{d}^\alpha i(t)}{\mathrm{d}t^\alpha} + Ri(t) = u_o(t) - u_N^{'}(t) \tag{13}$$

其中，$u_o(t)$ 为级联 H 桥桥臂侧输出电压，$u_N^{'}(t)$ 为变压器一次侧输出电压值，$u_N^{'}(t) = n \cdot u_N(t)$，$n$ 为变压器变比，$u_N(t)$ 为中性点电压。

进一步化简可得：

$$\frac{\mathrm{d}^\alpha i(t)}{\mathrm{d}t^\alpha} = -\frac{R}{L_\alpha} i(t) + \frac{1}{L_\alpha}[u_o(t) - u_N^{'}(t)] \tag{14}$$

对式(14)两边进行 t_0 到 t_1 的 α 阶积分可得：

$${}_{t_0}^{C}\mathcal{D}_{t_1}^{\alpha} \frac{\mathrm{d}^\alpha i(t)}{\mathrm{d}t^\alpha} dt = {}_{t_0}^{C}\mathcal{D}_{t_1}^{\alpha} \left[-\frac{R}{L_\alpha} i(t) + \frac{1}{L_\alpha}[u_o(t) - u_N^{'}(t)] \right] dt \tag{15}$$

展开可得：

$$i(t_1) - i(t_0) = {}_{t_0}^{C}\mathcal{D}_{t_1}^{\alpha} \left[-\frac{R}{L_\alpha} i(t) + \frac{1}{L_\alpha}[u_o(t) - u_N^{'}(t)] \right] dt \tag{16}$$

令 $f[t, i(t)] = -(R / L_\alpha) i(t) + [u_o(t) - u_N^{'}(t)] / L_\alpha$，基于 Caputo 分数阶积分定义 ${}_{t_0}^{C}\mathcal{D}_{t_1}^{\alpha} y(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^{t_1} \frac{y(t)}{(t_1 - t)^{1-\alpha}} \mathrm{d}t$，由式可得：

$$i(t_1) - i(t_0) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^{t_1} \frac{f[t, i(t)]}{(t_1 - t)^{1-\alpha}} dt \tag{17}$$

令 $t_0 = t_k$、$t_1 = t_{k+1}$，考虑 $t_k \to t_{k+1}$，则有 $f[t_k, i(t_k)] = f[t_{k+1}, i(t_{k+1})]$，此时开关控制间隔 $h = t_{k+1} - t_k$，将式(17)离散化可得：

$$i(t_{k+1}) = i(t_k) + \frac{h^\alpha}{\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot f[t_k, i(t_k)] \tag{18}$$

将 $f[t_k, i(t_k)]$ 展开可得：

$$i(t_{k+1}) = i(t_k) + \frac{h^\alpha}{\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot [-\frac{R}{L_\alpha} i(t_k) + \frac{1}{L_\alpha} u_o(t_k) - \frac{1}{L_\alpha} u_N^{'}(t_k)] \tag{19}$$

令 $K = \frac{h^\alpha}{\alpha \cdot \Gamma(\alpha)}$，$F = \frac{R}{L_\alpha}$，$Y = \frac{1}{L_\alpha}$，进一步简化得：

$$i(t_{k+1}) = (1 - KF) \cdot i(t_k) + KY \cdot [u_o(t_k) - U_N^{'}(t_k)] \tag{20}$$

2 分数阶模型预测控制有源消弧系统设计

本系统采用分数阶模型预测控制（FOMPC）。如表 2 所示，五种开关状态组合对应五种不同的输出电平。在每个采样周期内，需预测消弧逆变器输出电流并对比目标函数，最终选择最优开关状态进行控制。

FOMPC 消弧系统的结构如图 11 所示。图中，$U_N(t_k)$ 和 $i(t_k)$ 分别代表中性点电压与消弧逆变器输出电流；$U_N(t_k)$ 和 $i(t_k)$ 是其在 k 时刻的采样值；$S(t_k)$ 为最优控制开关状态；$i^*(t_{k+1})$ 参考补偿电流值。其工作流程图如图 12 所示。

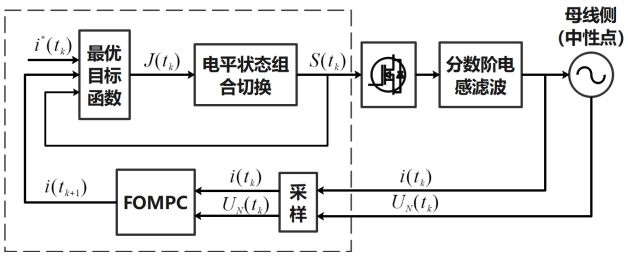

图 11 FOMPC 消弧系统原理图

Fig.12 FOMPC Arc Suppression System Schematic Diagram

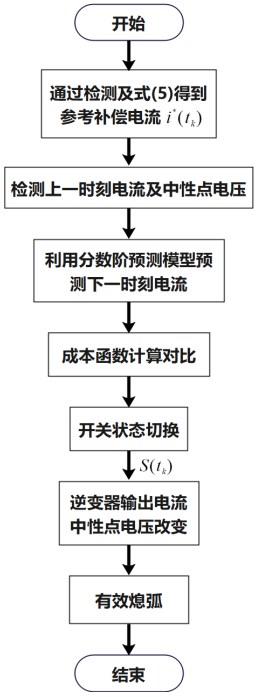

图 12 FOMPC 消弧流程图

Fig.11 FOMPC Arc Suppression Flowchart

3 硬件在环实验验证

为验证采用分数阶拓扑及控制器可有效消弧，本研究搭建了图 13 所示的 10 kV 配电网模型，并基于 StarSim 6060 HIL 仿真器与 MT 1070 RCP 控制器构建硬件在环实验平台进行验证，硬件在环实验设备如图 14 所示。

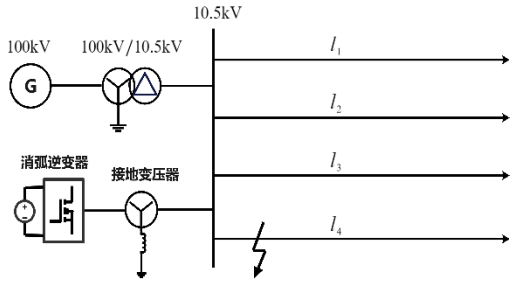

图 13 10kV 配电网模型

Fig.13 10kV distribution network model

图 14 硬件在环实验设备

Fig.14 Hardware-in-the-loop experimental equipment

图 8 系统采用双级联 H 桥作为消弧逆变器，其单个 H 桥功率单元直流电压为 6 kV，通过 RL 滤波经接地变压器中性点接入系统，中性点通过带有 3%过补偿度的消弧线圈接地，为 195 mH；电源向四条馈线输电，各个馈线单相的电阻为 1 uΩ、电感为 1 uH、对地电容为 4.2 uF,线路整体的对地电容值为 50.4 uF；硬件在环具体实验参数见表 3。

表 3 硬件在环实验参数

Tab.3 Hardware in-loop experimental parameters

系统种类	参数	数值
有源消弧系统	开关频率/kHz	40
	采样频率/kHz	40
	直流侧电源/kV	6
	输出侧滤波电感/mH	100
	输出侧电阻/mΩ	10
	H 桥级联数量	2
配电网	交流侧线电压/kV	10.5
	单相对地电容/uF	4.2
	总对地电容/uF	50.4
	单相对地泄露电阻/kΩ	20

有源消弧系统与配电网系统在 StarSim 6060 HIL 仿真器中建模，控制系统（含参考信号生成及算法）运行于 MT 1070 RCP 控制器中。

配电网模型模拟第四条馈线 A 相首端发生单相接地故障。0 ms 时短路电流已达稳态；100 ms 后投入消弧逆变器进行故障电流补偿。

首先对比不同阶次下的级联 H 桥多电平消弧逆变器的电流跟踪性能，效果对比图如图 15 所示，动态参数如表 4 所示。分对比析可知，不同阶次的分数阶控制均可稳定跟踪参考电流；随电感阶次的下降，可显著提升电流跟踪的快速性，减少调节时间，并提高幅度增益；此外，从图 15(d)中可看出，输出电流随阶次下降，相位偏移有所改善。

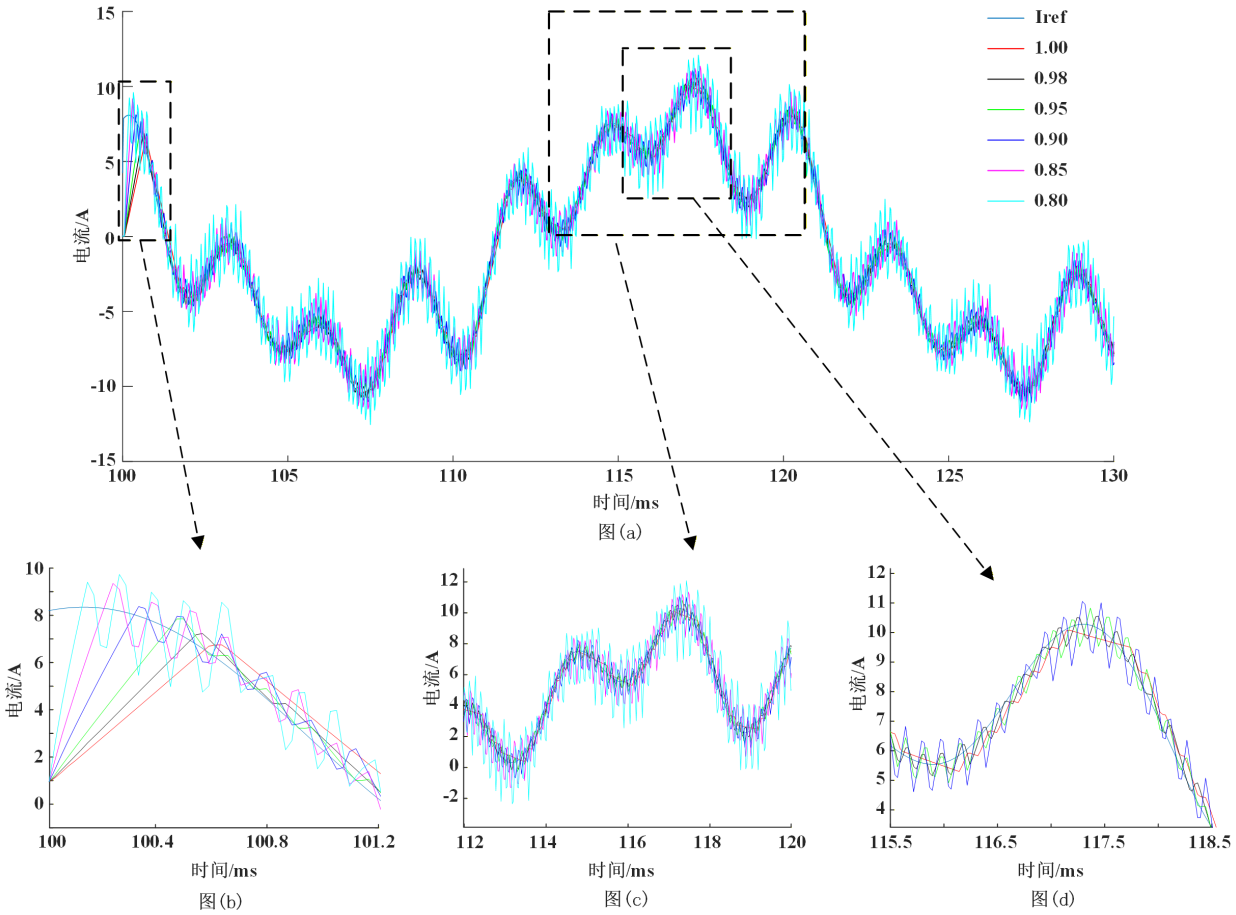

图 15 电流跟踪效果对比图

Fig.15 Current tracking effect comparison chart

表 4 不同阶次下的动态响应参数

Tab.4 Dynamic response parameters at different orders

阶次	1	0.98	0.95	0.90	0.85	0.80
响应时间/ms	0.63	0.55	0.42	0.29	0.19	0.11

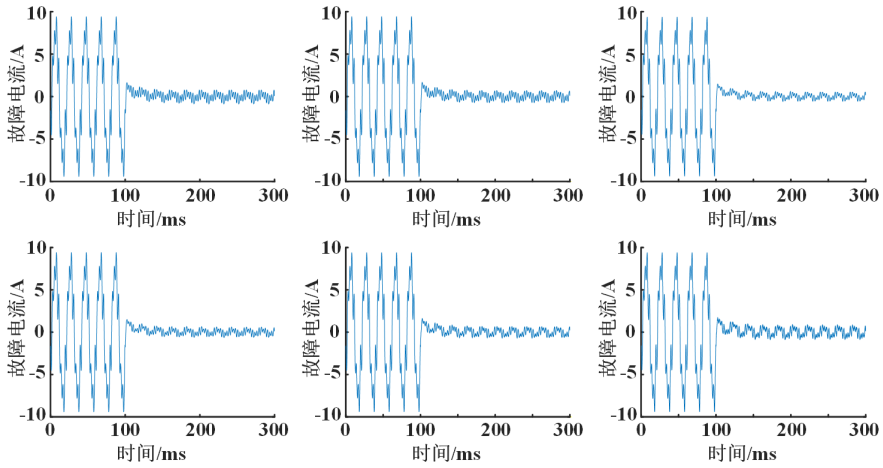

图 16 接地电阻为 10 Ω时不同阶次下消弧对比图

Fig.16 Comparison diagram of arc suppression at different orders when the grounding resistance is 10 Ω

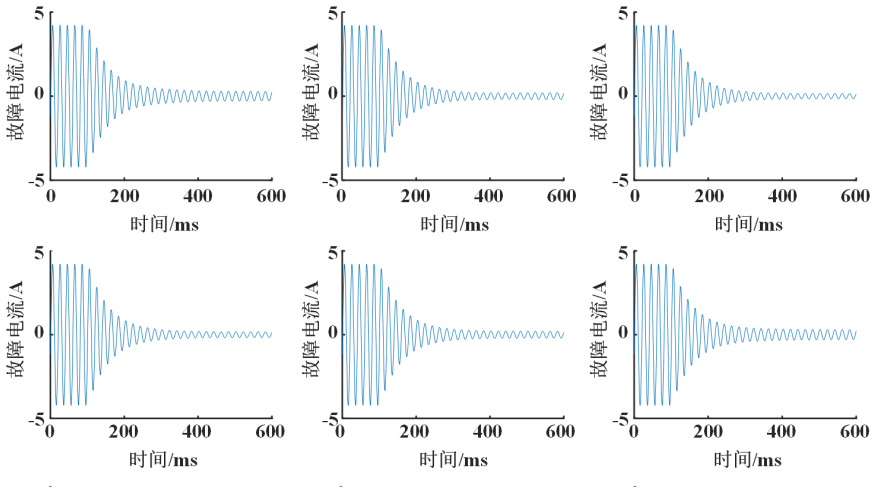

图 17 接地电阻为 1 000 Ω时不同阶次下消弧对比图

Fig.17 Comparison diagram of arc suppression at different orders when the grounding resistance is 1000 Ω

有源消弧硬件在环实验采用不同阶数的电感电路及相应的 MPC 及 FOMPC 控制进行验证，接地电阻 R_d 分别为 10 Ω及 1 000 Ω。消弧结果对比如图 16 及图 17 所示，表 5 为有源消弧补偿前故障电流数值，即 100 ms 前未投入有源消弧逆变器，仅消弧线圈补偿稳定时的故障电流数据；表 6 为有源消弧逆变器补偿后稳定的残流数值，由图表分析可知，随阶数的下降，相比于整数阶，分数阶控制的增益幅度不断上升，相位偏差逐渐下降，呈现出不同的消弧特性。从消弧效果的角度出发，0.95 阶控制器的总故障电流含量最低，消弧效果最好，且相比于整数阶控制，其控制响应速度提高了 33.33%。

其中总故障电流含量计算方式为：

$$I=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}I_k^2} \tag{21}$$

式中，I 为总故障电流含量，I_k 为 k 次谐波有效值。

表 5 有源消弧补偿前故障电流数值

Tab.5 The value of fault current before active arc suppression compensation

接地电阻/Ω	阶次	工频故障残流/A	5 次谐波故障残流/A	7 次谐波故障残流/A	总故障电流含量/A
10	1	7.612 1	1.138 9	1.958 5	7.942 1
1000	1	4.216 6	0.018 5	0.026 0	4.216 7

表 6 有源消弧补偿后故障电流数值

Tab.6 The residual current value after active arc suppression compensation

接地电阻/Ω	阶次	工频故障残流/A	5 次谐波故障残流/A	7 次谐波故障残流/A	总故障电流含量/A
10	1	0.335 1	0.202 7	0.458 2	0.602 7
	0.98	0.323 5	0.184 3	0.416 2	0.558 4
	0.95	0.272 2	0.146 5	0.268 2	0.409 2
	0.90	0.266 0	0.145 4	0.301 7	0.427 7
	0.85	0.377 2	0.190 9	0.303 2	0.520 2
	0.80	0.496 7	0.204 5	0.346 7	0.639 4
1 000	1	0.287 1	0.004 9	0.009 4	0.287 2
	0.98	0.210 5	0.003 1	0.005 6	0.210 6
	0.95	0.158 4	0.002 4	0.003 4	0.158 4
	0.90	0.181 8	0.002 9	0.003 8	0.181 8

0.85	0.214 3	0.003 2	0.004 1	0.214 4
0.80	0.306 5	0.003 8	0.004 3	0.306 6

4 结论

本文针对新型电力系统中因谐波含量增加而导致的电弧难消除问题，提出了一种基于分数阶模型预测控制（FOMPC）的有源消弧方法。硬件在环实验表明，随着电感阶数降低，分数阶消弧逆变器的幅值增益逐渐增大，相位滞后显著减小。当采用 0.95 阶 FOMPC 时，系统响应速度提升 33.33%，总故障电流含量降低超过 30%。综上可得，该算法能够有效提升消弧性能，增强系统运行的可靠性与安全性，对推动电力电子控制方法应用具有重要意义。此外，本文研究聚焦于控制算法设计，所有分析均假设功率开关器件处于安全工作区。尽管未涉及器件应力分析，但其对系统可靠性至关重要，未来拟进行电力电子器件应力分析研究。

参考文献/References:

[1] 常新建，邵文权，程远，等．基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术，2023，42(02): 161-169.
Chang Xinjian, Shao Wenzhuan, Cheng Yuan, et al. Active Fault Disposal for Single-Phase Ground Fault in Distribution Network Based on Model Predictive Control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(02): 161-169.

[2] FREEBORN T J, MAUNDY B, ELWAKIL A S. Measurement of supercapacitor fractional-order model parameters from voltage-excited step response[J]. IEEE journal on emerging and selected topics in circuits and systems,2013, 3(3): 367-376.

[3] WEI Z H, ZHANG B, JIANG Y W. Analysis and modeling of fractional- order buck converter based on Riemann- Liouville derivative[J]. IEEE access,2019,7: 162768-162777.

[4] 柴秀慧，曹晗，张波，等．Boost 变换器全分数阶化系统分析与控制性能研究[J]. 电源学报，2019，17(6): 27-33.
Chai Xiuhui, Cao Han, Zhang Bo, et al. Research on System Analysis and Control Performance of Fully Fractional-Order Boost Converter [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 27-33.

[5] 胡旭旭，范秋华．Buck-Boost 变换器断续模式下的分数阶建模与分析[J]. 现代电子技术，2020，43(24): 126-130，134.
Hu Xuexu, Fan Qiuhua. Fractional-order Modeling and Analysis of Buck-Boost Converter in Interrupted Mode [J]. Modern Electronics Technology, 2020, 43(24): 126-130, 134.

[6] 李啸骢，侯立亮，罗雪丽，等．三相逆变并网系统的分数阶建模与控制器设计研究[J]. 太阳能学报，2023，44(03): 415-424.
Li Xiaochong, Hou Liangliang, Luo Xueli, et al. Research on Fractional Order Modeling and Controller Design for Three-Phase Inverter Grid Connected System [J]. Solar Energy Journal, 2023, 44(03): 415-424.

[7] 杨铎炯,林振福,聂智杰,等．计及低复杂度少保守性的并联分数阶逆变器系统稳定性研究[J].电力系统保护与控制，2025，53(01): 47-58.
Yang Duotong, Lin Zhenfu, Nie Zhijie, et al. Stability Study of Parallel Fractional-Order Inverter System Considering Low Complexity and Less Conservatism [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(01): 47-58.

[8] 何彪，林珊，王孝洪，等．融合改进重复控制–分数阶自抗扰的 LCL 型并网逆变器电流控制（英文）[J].控制理论与应用，2025，42(06):1101-1113.
He Biao, Lin Shan, Wang Xiaohong, et al. Current Control of LCL-Type Grid-Connected Inverter Based on Improved Repetitive Control-Fractional Order Active Disturbance Rejection Control [J]. Control Theory & Applications, 2025, 42(06): 1101-1113.

[9] 赵强松,周国辉,夏元清．分数阶插入式前馈重复控制及单相并网逆变器应用[J].控制理论与应用,2025,42(06):1114-1123.
Zhao Qiangsong, Zhou Guohui, Xia Yuanqing. Fractional-order Inserted Feedforward Repeated Control and Its Application in Single-phase Grid-connected Inverter [J]. Control Theory & Applications, 2025, 42(06): 1114-1123.

[10] 杨鸿宇,周克亮,唐超,等．可编程交流电源的分数阶多重复控制技术研究[J].智慧电力,2023,51(09):74-80.
Yang Hongyu, Zhou Keliang, Tang Chao, et al. Research on Fractional-Order Multi-Repeat Control Technology for Programmable AC Power Supply [J]. Smart Power, 2023, 51(09): 74-80.

[11] 吴义敏．应用于有源电力滤波器的单相谐波检测的研究[D].合肥工业大学,2012.
Wu Yimin. Research on Single-Phase Harmonic Detection Applied to Active Power Filter [D]. Hefei University of Technology, 2012.

[12] WANG F, MA X K. Transfer function modeling and analysis of the open-loop Buck converter using the fractional caculus[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(3): 30-506

[13] 薛定宇．分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京: 科学出版社，2018.
Xue Dingyu. Fractional Calculus and Fractional Control [M]. Beijing: Science Press, 2018.

[14] Belqasem A ,Kanagavel R ,Vairavasundaram I , et al.A Novel Single-Phase Shunt Active Power Filter with a Cost Function Based Model Predictive Current Control Technique[J].Energies,2022,15(13):4531-4531.