DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.115 **中图分类号**：TM771 **文献标志码**：A

谐波分量注入式微电网控保协同技术研究

薛林燚，牟龙华，徐瑞洁
(同济大学电子与信息工程学院，上海 201804)

摘要：微电网中的逆变型分布式电源IIDG(inverter-interfaced distributed generation)具有特殊的输出特性，传统保护方案不再适用于微电网。与此同时，“注入式主动保护”思想为微电网保护提供了新思路，但非注入源的分流问题导致注入式保护性能不佳。为此，基于控保协同的思想，研究了谐波分量注入式孤岛微电网主动保护方法。通过分析IIDG的频率响应特性，设计了注入源及非注入源的控制器，并建立了相应的启动判据。故障发生时，注入源向微电网注入幅值恒定的谐波分量特征信号，非注入源限制该特征信号的分流，使微电网的特征频率等效网络呈单电源结构。仿真结果表明，所提注入控制策略能可靠启动谐波分量注入，同时解决了特征信号的分流问题，为注入式微电网保护提供了解决方案。

关键词：微电网；逆变型分布式电源；正序谐波分量；特征信号；注入方案

Research on Control-protection Coordination Technology for Microgrids Based on Harmonic Component Injection

XUE Linyi, MU Longhua, XU Ruijie
(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Since the inverter-interfaced distributed generations (IIDGs) in microgrids exhibit special output characteristics, traditional protection schemes are no longer suitable for microgrids. Simultaneously, the idea of “Signal-injected active protection” introduces a novel perspective on microgrid protection. However, the shunt problem of non-injection source results in a poor protection performance. Under this background, in light of the idea of control-protection coordination, an active protection method for microgrids based on harmonic component injection is proposed. First, the frequency response characteristics of IIDG are analyzed. Then, the controllers of injection source and non-injection source are designed, and the corresponding start-up criteria are established. When a fault occurs, the injection source injects the characteristic signal of harmonic component with constant amplitude into the microgrid, while the non-injection source limits the shunt of the characteristic signal, so that the characteristic frequency equivalent network of the microgrid exhibits a single-source structure. Simulation results show that the proposed strategy can reliably start the harmonic component injection and solve the shunt problem of the characteristic signal, providing a solution for signal-injected microgrid protection.

Keywords: Microgrid; inverter-interfaced distributed generation (IIDG); positive-sequence harmonic component; characteristic signal; injection scheme

微电网作为分布式能源利用的有效途径[1-2]，近年来得到了大力发展。微电网中的分布式电源主要通过电力电子逆变器进行控制，称为逆变型分布式电源IIDG(inverter-interfaced distributed generate-on)。IIDG的不断接入给微电网保护带来巨大挑战，导致传统的保护方案不再适用[3]，主要体现为：IIDG 的过流能力有限，其输出电流一般不超过额定电流的1.2~2.0倍，导致故障电流与负载电流相近，传统的过流保护难以整定动作阈值；微电网故

收稿日期：2023-11-17；**修回日期**：2023-12-08；**录用日期**：2023-12-20；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：上海市科学技术委员会资助项目(21142201200)
This work is supported by Shanghai Municipal Commission of Science and Technology under the grant 21142201200

障时，各 IIDG 需进行低电压穿越，电压与电流的相位关系存在不确定性，导致基于电压和电流相位差的传统方向元件失效；微电网在并网与孤岛模式下故障电流等级差异显著，传统的保护方案难以同时适用于 2 种运行模式。

近年来，国内外已有不少研究专注于微电网继电保护方案，但现有保护方案主要是根据故障时的电路参数设计[4-7]，属于被动式保护。一些研究人员提出利用 IIDG 的控制策略进行主动式保护方案的设计，从而提高故障的甄别能力。文献[8-11]提出在故障时向 IIDG 控制回路注入特征信号进行故障检测。文献[8]对电流限幅器进行改进，使故障发生时 IIDG 能够自动注入接近工频的间谐波，该注入方法不依赖故障检测装置，但间谐波的提取难度较大；文献[9]提出所有 IIDG 注入不同频率的谐波，根据馈线双端不同频率的电流值进行故障定位，但大量不同频率的谐波注入易导致微电网受到二次损害；文献[10]仅对故障相注入谐波，根据合成的谐波电流余弦相似度设计保护方案，但每一相都需要单独的比例谐振 PR(proportional resonant)控制器，增加了设计难度；文献[11]在电流内环中注入一定含量的高次谐波，并基于此提出谐波含有率差动保护方案，但注入的谐波阶次过高，经 IIDG 出口处滤波器时会发生衰减现象。主动式保护相比于被动式保护更具优势，但现有主动式保护普遍存在不足，主要体现为：注入控制没有兼顾工频控制，导致微电网稳定性受到影响；没有合理选取特征信号，导致注入系统的特征信号发生衰减或过大；忽略非注入源 IIDG 对特征信号的分流，导致主动式保护性能不佳。

针对现有注入式保护方案存在的不足，提出 1 种谐波分量注入控制方案。首先对微电网注入式保护的特征信号注入问题进行研究，在此基础上设计了 IIDG 的辅助控制环节，并建立了注入启动判据及限流启动判据。最后在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建微电网模型，验证所提注入控制方案在各种故障情形下的有效性，结果表明所提注入控制方案可以有效避免特征信号的分流问题，在微电网内形成明显的故障特征。

1 IIDG 频率响应分析

图 1 为典型的 IIDG 拓扑结构，图中：U_{dc} 为直流侧电压；L_1、L_2 和 C 分别为 LCL 滤波器的滤波电感和滤波电容。

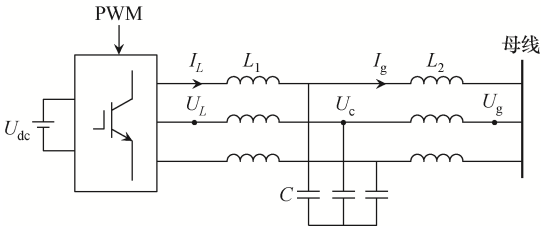


图 1 IIDG 的拓扑结构

Fig. 1 Topology of IIDG

LCL 滤波器具有抑制谐波分量的作用，因此在设计基于注入特征信号的保护方案前，应分析 IIDG 出口处 LCL 滤波器的频率响应特性。LCL 滤波器的传递函数为

$$G(s)=\frac{1}{L_1L_2Cs^3+(L_1+L_2)s} \tag{1}$$

由式(1)可知，LCL 滤波器在低频段可以保持较好的增益，在高频段的增益衰减程度大，可以有效滤除高次谐波，但 LCL 滤波器存在谐振尖峰，可能导致系统发生振荡，损坏 IIDG 中的电力电子元件。谐振频率的表达式为

$$f_{res}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} \tag{2}$$

注入特征信号的频率一般低于各 IIDG 出口处 LCL 滤波器的谐振频率，因此对于非注入源 IIDG 而言，LCL 滤波器无法抑制特征信号的流入，而且特征信号的频率越远离谐振频率，LCL 滤波器对其增益越高，特征信号的分流现象越明显，从而可能导致信号注入式保护性能不佳。

图 2 为微电网的简化模型。发生故障时，IIDG1 作为注入源，向微电网中注入幅值为 I_h(h 为谐波阶次)的特征信号。

根据图 2 可得特征信号的分布情况为

$$I_{\mathrm{f},h}=I_h\frac{Z_{\mathrm{L},h}\parallel Z_{\mathrm{DG2},h}}{R_{\mathrm{f}}+Z_{\mathrm{L},h}\parallel Z_{\mathrm{DG2},h}} \tag{3}$$

$$I_{\mathrm{DG2},h}=I_h\frac{R_{\mathrm{f}}\parallel Z_{\mathrm{L},h}}{Z_{\mathrm{DG2},h}+R_{\mathrm{f}}\parallel Z_{\mathrm{L},h}} \tag{4}$$

式中：$I_{\mathrm{f},h}$和$I_{\mathrm{DG2},h}$分别为流向故障点和 IIDG2 的特征信号幅值；$Z_{\mathrm{DG2},h}$和$Z_{\mathrm{L},h}$分别为 IIDG2 和负载在注入特征信号频率下的等效阻抗；R_{f}为故障点过渡电阻；“‖”表示并联。$Z_{\mathrm{DG2},h}$的大小主要与 IIDG2 的 LCL 滤波器相关，而在实际系统中 IIDG 出口滤波器的谐振频率分布范围很广，因此$Z_{\mathrm{DG2},h}$可能较小。根据式(3)和式(4)，若$Z_{\mathrm{DG2},h}$较小，则$I_{\mathrm{DG2},h}$会较大、$I_{\mathrm{f},h}$会较小，即非注入源 IIDG2 会分流较多的特征信号，导致故障馈线测得的特征信号幅值较小，不利于故障的检测与切除。

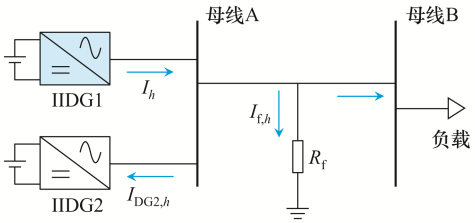


图 2　微电网简化模型

Fig. 2 Simplified model of microgrid

2　特征信号注入控制策略

本节提出在注入源及非注入源的电流环上叠加辅助控制环节，一旦检测到故障，注入源的辅助控制环节被使能，向微电网注入幅值恒定的特征信号；同时，非注入源的辅助控制环节限制特征信号的流入，通过这一控制策略，使故障处的特征信号更为明显，方便后续保护方案的设计。

2.1　注入源的控制方案

在主从控制的孤岛微电网中，通常存在 1 台容量较大且输出稳定的构网型 IIDG 作为主电源，其余跟网型 IIDG 均为从电源。主电源用于维持系统的电压和频率稳定，一般情况下不可退出运行，因此本文定义主电源为注入源。图 3 为注入源的控制结构，其中$I_{\mathrm{ref},h}$为特征信号参考值。

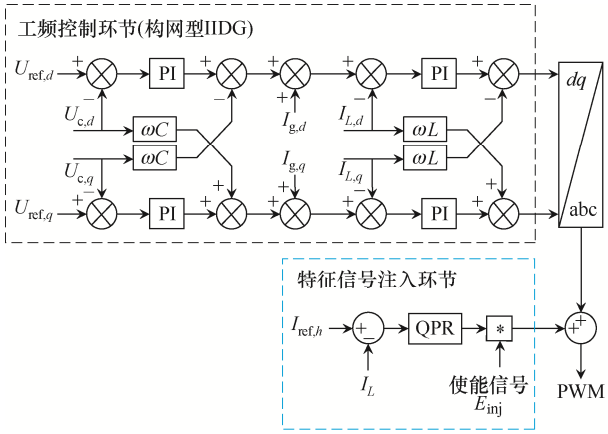


图 3　注入源的控制结构

Fig. 3 Control structure of injection source

注入源的控制由工频控制环节和特征信号注入环节组成。工频控制环节为电压外环、电流内环结构，旨在维持电压稳定，其底层控制器为比例-积分 PI(proportional integral)控制器。由于 PI 控制器仅对直流信号有较高增益，无法有效地控制谐波分量，因此选用准比例谐振 QPR(quasi proportional resonant)控制器作为特征信号注入环节的底层控制器。QPR 控制器的传递函数为

$$G_{\mathrm{QPR}}(s)=k_{\mathrm{p}}+\frac{2k_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{c}}s}{s^2+2\omega_{\mathrm{c}}s+\omega_h^2} \tag{5}$$

式中：k_{p}和k_{r}分别为 QPR 控制器的比例系数和谐振系数；ω_{c}和ω_h分别为 QPR 控制器的截止频率与工作频率。

根据式(5)可得 QPR 控制器的频率响应特性如图 4 所示。可以看出，QPR 控制器仅对工作频率附近的信号有较大的增益，对其他频率的信号几乎没有增益效果。因此，QPR 控制器可以实现特征信号

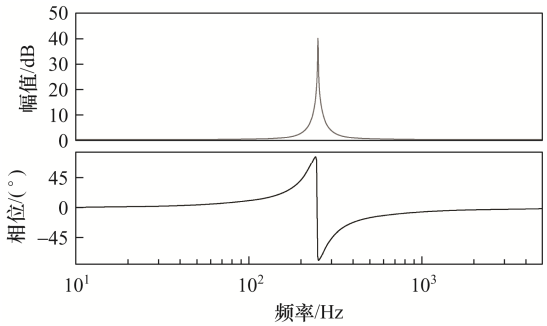


图 4　QPR 控制器的频率响应特性

Fig. 4 Frequency response characteristics of QPR controller

与工频量的独立控制。相比于 PR 控制器，QPR 控制器对特征信号的频率偏移更加宽容，可以降低跟踪控制的误差。

微电网未发生故障时，使能信号 E_{inj} 置 0，特征信号注入环节不影响工频控制环节的输出；微电网检测到故障时，使能信号 E_{inj} 置 1，特征信号注入环节通过 QPR 控制器对逆变器侧电感电流 I_L 进行控制，以恒流的形式向微电网注入频率为 f 的正序特征信号，特征信号的参数选择将在第 3 节介绍。

2.2 注入源的等效模型

特征信号注入环节的控制框图如图 5 所示。

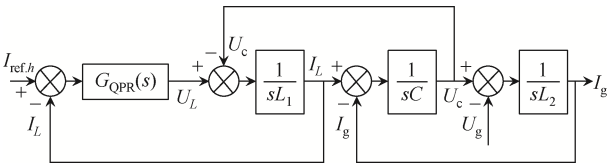


图 5 特征信号注入环节控制框图

Fig. 5 Control block diagram of characteristic signal injection loop

根据图 5 可求得注入源输出电流及等效阻抗的传递函数分别为

$$T(s)=\frac{G_{\text{QPR}}(s)}{L_1L_2Cs^3+L_2CG_{\text{QPR}}(s)s^2+(L_1+L_2)s+G_{\text{QPR}}(s)} \tag{6}$$

$$Z_{\text{inj}}(s)=\frac{L_1L_2Cs^3+L_2CG_{\text{QPR}}(s)s^2+(L_1+L_2)s+G_{\text{QPR}}(s)}{L_1Cs^2+CG_{\text{QPR}}(s)s+1} \tag{7}$$

根据式(6)与式(7)，可以得到注入源在特征信号作用下的等效模型如图 6 所示。注入源可等效为恒流源并联阻抗的模型。将 s=j2πf 代入式(7)可得 $Z_{\text{inj}}(s)$为高阻，因此，在故障期间注入源近似向系统注入幅值恒定的特征信号。

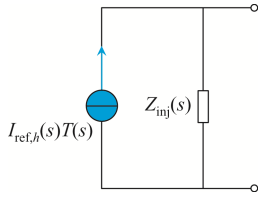


图 6 注入源的等效模型

Fig. 6 Equivalent model of injection source

2.3 注入源的启动判据

为保证特征信号仅在微电网发生故障时注入系统，需要设计合理的故障检测判据。发生对称故障时，电压在短时间内明显跌落；而发生不对称故障时，零、负序分量增加[12]，因此本文提出兼顾工频电压跌落和零、负序电压增加的双故障检测判据，注入源辅助控制环节的使能信号 E_{inj} 由以下方式确定

$$a=\begin{cases}1 & U_{50}<U_{\text{set1}}\\ 0 & U_{50}\geqslant U_{\text{set1}}\end{cases} \tag{8}$$

$$b=\begin{cases}1 & U^-+U^0\geqslant U_{\text{set2}}\\ 0 & U^-+U^0<U_{\text{set2}}\end{cases} \tag{9}$$

$$E_{\text{inj}}=a\vee b \tag{10}$$

式中：a 为工频电压跌落判据；b 为工频零、负序电压增加判据；U_{50} 为注入源出口处的工频电压幅值，发生不对称故障时取三相最小值；U_{set1} 为工频电压跌落判据的检测阈值；U^-为注入源出口处的工频负序电压幅值；U^0 为注入源出口处的工频零序电压幅值；U_{set2} 为工频零、负序电压幅值和的检测阈值；“∨”为逻辑“或”。

根据 IEEE 1547 标准，微电网正常运行时，其工频电压与额定电压的偏差不应超过 10%[13]，取 U_{set1} 为

$$U_{\text{set1}}=0.9U_{\text{n}} \tag{11}$$

式中，U_{n} 为系统的额定电压幅值。微电网正常运行时不含零、负序分量，但考虑到测量误差，取 U_{set2} 为

$$U_{\text{set2}}=0.02U_{\text{n}} \tag{12}$$

2.4 非注入源的控制方案

在孤岛微电网中，跟网型 IIDG 可能会退出运行，为保证微电网保护的可靠性，定义从电源为非注入源。如第 1 节所述，非注入源对特征信号存在分流现象，为避免特征信号大量流入非注入源，对非注入源的控制结构进行改进，图 7 为非注入源的控制结构。

非注入源的控制由工频控制环节和特征信号限流环节组成。工频控制环节为功率外环、电流内

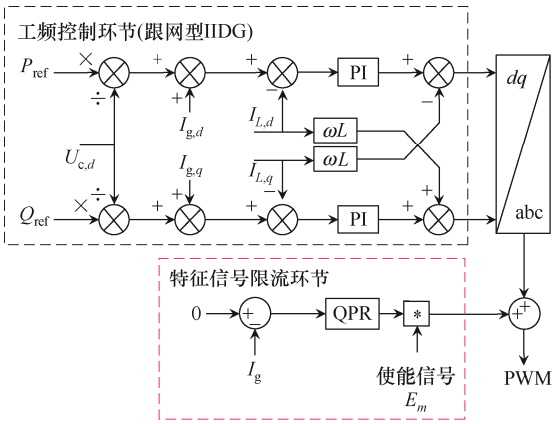


图 7　非注入源的控制结构

Fig. 7 Control structure of non-injection source

环结构，旨在输出恒定的功率，其底层控制器为 PI 控制器；特征信号限流环节的底层控制器仍采用 QPR 控制器。微电网正常运行时，特征信号限流环节不会影响 IIDG 的输出；发生故障时，特征信号限流环节通过 QPR 控制器将流入非注入源的特征信号控制到参考值，使非注入源对特征信号呈高阻，同时，工频控制环节向微电网中注入无功功率进行低电压穿越。

2.5　非注入源的等效模型

特征信号限流环节的控制框图如图 8 所示。

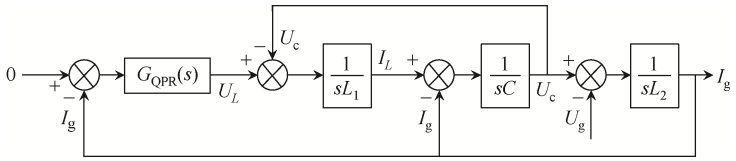


图 8　特征信号限流环节控制框图

Fig. 8 Control block diagram of characteristic signal limiting loop

根据图 8 可求得非注入源等效阻抗的传递函数为

$$Z_{\lim}=\frac{L_1L_2Cs^3+(L_1+L_2)s+G_{\mathrm{QPR}}(s)}{L_1Cs^2+1} \tag{13}$$

将 s=j2πf 代入式(13)可知 $Z_{\lim}(s)$呈高阻特性，因此在故障期间非注入源几乎不会对特征信号产生分流。

2.6　非注入源的启动判据

微电网发生故障时，注入源启动特征信号注入环节，特征信号在微电网内流通。非注入源对特征信号的分流情况与 LCL 滤波器的谐振频率相关，而在实际系统中，各 IIDG 的 LCL 滤波器参数往往是未知的。本文以流入非注入源的特征信号幅值作为特征信号限流环节的启动判据，从而确保大部分的特征信号流向故障点，可表示为

$$E_m=\begin{cases}1 & I_{m,h}\geqslant I_{\mathrm{set}}\\ 0 & I_{m,h}<I_{\mathrm{set}}\end{cases} \tag{14}$$

式中：E_m 为非注入源 IIDGm 辅助控制环节的使能信号；$I_{m,h}$ 为流入非注入源 IIDGm 的特征信号幅值，在不对称情况下取三相最小值；I_{set} 为特征信号幅值的检测阈值。

为保证特征信号限流环节启动的快速性和灵敏性，I_{set} 的取值越小越好，但由于微电网在正常运行时也存在一定的谐波，为避免特征信号限流环节在微电网正常运行时误启动，取 I_{set} 为

$$I_{\mathrm{set}}=0.05I_h \tag{15}$$

3　特征信号的选择

3.1　特征信号的频率选择

特征信号的频率应合理选取，目的主要有 2 点：其一，特征信号可以在微电网内流通；其二，特征信号可以被继电保护装置精确测量。

(1)特征信号的频率应低于 10 倍工频，即

$$f<10f_{\mathrm{n}} \tag{16}$$

式中，f_{n} 为电网额定频率。IIDG 出口处滤波器的截止频率一般设置在额定频率的 10 倍到 1/2 倍开关频率之间[14]，按式(16)选取特征信号的频率可以避免特征信号被滤除。

(2)特征信号的频率应远离工频，即

$$f>>f_{\mathrm{n}} \tag{17}$$

特征信号的测量依赖电流互感器，而电流互感

器的激磁阻抗与频率正相关[9]，按式(17)选取特征信号频率可使电流互感器在频率f下工作于线性区域，避免出现饱和现象，同时也有利于特征信号与工频信号的解耦控制。

考虑到后续的检测成本，特征信号的频率不宜过高且应为工频的整数倍，因此本文取特征信号的频率为 250 Hz。

3.2 特征信号的幅值选择

特征信号的幅值要求如下。

(1)特征信号的幅值不宜过小。根据 IEEE 1547 标准，微电网正常运行时，谐波次数在 3~11 之间的奇次谐波电流分量不应超过 4%。为了区分固有谐波[15]与特征信号，特征信号的幅值应满足

$$I_h > 4\%I_{\mathrm{n}} \tag{18}$$

式中，I_{n}为注入源的额定电流幅值。

(2)特征信号的幅值不宜过大。IIDG 的过流能力有限，若特征信号的幅值过大，一方面会影响 IIDG 的工频输出能力，另一方面会影响电能质量。特征信号的幅值应满足

$$cI_{\mathrm{n}} + I_h \leqslant dI_{\mathrm{n}} \tag{19}$$

式中：c 为工频输出电流上限的系数；d 为总输出电流上限的系数。取 c=1.8、d=2，实际工程中，可根据 IIDG 的配置情况调整参数。

4 仿真验证

4.1 微电网模型的建立

在 MATLAB/Simulink 中搭建图 9 所示的 380 V 微电网模型，对本文所提注入方案进行验证。其中，IIDG1 为构网型 IIDG，容量为 23.3 kVA，额定电流幅值为 50 A；IIDG2~IIDG4 为跟网型 IIDG，容量均为 9.3 kVA，额定电流幅值均为 20 A；L_{D1}~L_{D8}均为三相对称负载，容量均为 6.4 kVA；PCC 为微电网的公共并网点；A_1~A_2、B_1~B_3、C_1~C_4、D_1~D_3、E_1~E_3、F_1~F_4、G_1~G_3、H_1~H_3、I_1~I_3为馈线各端的断路器；各输电线路的长度均为 0.5 km，线路单位阻抗均为 0.642+j0.083 Ω/km。注入启动判据的阈值U_{set1}为 342 V，U_{set2}为 7.6 V。

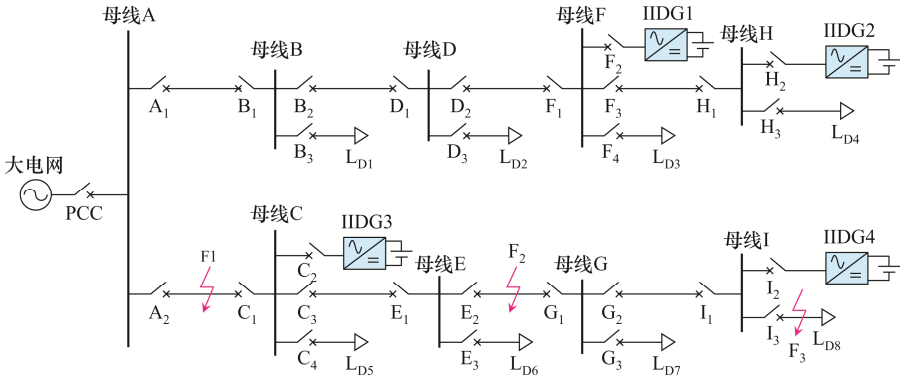


图 9 典型微电网模型

Fig. 9 Typical model of microgrid

4.2 不同故障类型的仿真

故障发生后，注入源 IIDG1 启动特征信号注入环节，向微电网注入频率为 f = 250 Hz、幅值为 I_h=10 A 的正序谐波电流，同时，非注入源 IIDG2~IIDG4 启动特征信号限流环节。

(1)算例 1：t=0.5 s 时，F_1处发生三相接地故障，故障点过渡电阻为 5 Ω。

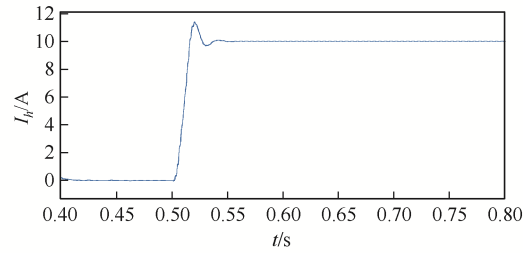
故障后的电气量见表 1，对故障后 IIDG1 与 IIDG2 出口处的电流使用 FFT 进行分解，特征信号幅值如图 10 所示。由表 1 及图 10 可知，故障后注入源 IIDG1 检测到工频电压幅值为 99.2 V，根据工频电压跌落判据启动特征信号注入环节。非注入源 IIDG2 根据特征信号幅值判据启动特征信号限流环节。IIDG2 出口处的特征信号幅值在故障发生后约 1 个工频周波内存在冲击现象，这与 IIDG 的控制策略有关。由表 1 可知，联络馈线 AC 发生三相

接地故障时，A_2 处测得的特征信号幅值为 8.87 A，C_1 处测得的特征信号幅值为 0 A，特征信号能够有效地流向故障点。

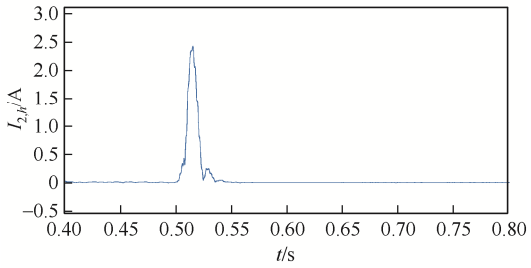
表 1　算例 1 中的电气量

Tab. 1 Electrical quantity in Case 1

电气量	幅值	电气量	幅值
U_{50}/V	99.20	$U^{-}+U^{0}$/V	0
$I_{A_1,h}$/A	8.87	$I_{B_1,h}$/A	8.87
$I_{B_2,h}$/A	9.06	$I_{D_1,h}$/A	9.06
$I_{D_2,h}$/A	9.38	$I_{F_1,h}$/A	9.38
$I_{F_3,h}$/A	0.53	$I_{H_1,h}$/A	0.53
$I_{A_2,h}$/A	8.87	$I_{C_1,h}$/A	0
$I_{C_3,h}$/A	0	$I_{E_1,h}$/A	0
$I_{E_2,h}$/A	0	$I_{G_1,h}$/A	0
$I_{G_2,h}$/A	0	$I_{I_1,h}$/A	0
$I_{B_3,h}$/A	0.22	$I_{C_4,h}$/A	0
$I_{D_3,h}$/A	0.38	$I_{E_3,h}$/A	0
$I_{F_4,h}$/A	0.54	$I_{G_3,h}$/A	0
$I_{H_3,h}$/A	0.53	$I_{I_3,h}$/A	0



(a)IIDG1出口处



(b)IIDG2出口处

图 10　IIDG 的特征信号幅值

Fig. 10 Amplitude of characteristic signal of IIDG

(2)算例 2：t=0.5 s 时，F_2 处发生 AB 相间短路故障，短路电阻为 10 Ω。

故障后的电气量见表 2，可知，联络馈线 EG 发生相间短路时，注入源 IIDG1 检测到工频电压幅值为 362.52 V，未跌落到检测阈值以下，工频电压跌落判据无效，但 IIDG1 的零、负序电压幅值和为 41.03 V，满足特征信号注入环节的启动判据。IIDG1 向微电网注入幅值为 10 A、频率为 250 Hz 的特征信号，IIDG2~IIDG4 根据特征信号幅值判据启动特征信号限流控制环节。E_2 处测得的特征信号幅值为 3.96 A，G_1 处测得的特征信号幅值为 1.59 A，特征信号能够有效地流向故障点。

表 2　算例 2 中的电气量

Tab. 2 Electrical quantity in Case 2

电气量	幅值	电气量	幅值
U_{50}/V	362.52	$U^{-}+U^{0}$/V	41.03
$I_{A_1,h}$/A	5.57	$I_{B_1,h}$/A	5.57
$I_{B_2,h}$/A	6.58	$I_{D_1,h}$/A	6.58
$I_{D_2,h}$/A	7.69	$I_{F_1,h}$/A	7.69
$I_{F_3,h}$/A	1.20	$I_{H_1,h}$/A	1.20
$I_{A_2,h}$/A	5.57	$I_{C_1,h}$/A	5.57
$I_{C_3,h}$/A	4.72	$I_{E_1,h}$/A	4.72
$I_{E_2,h}$/A	3.96	$I_{G_1,h}$/A	1.59
$I_{G_2,h}$/A	0.79	$I_{I_1,h}$/A	0.79
$I_{B_3,h}$/A	1.00	$I_{C_4,h}$/A	0.87
$I_{D_3,h}$/A	1.10	$I_{E_3,h}$/A	0.83
$I_{F_4,h}$/A	1.20	$I_{G_3,h}$/A	0.80
$I_{H_3,h}$/A	1.20	$I_{I_3,h}$/A	0.79

(3)算例 3：t=0.5 s 时，F_3 处发生 A 相接地故障，过渡电阻为 25 Ω。

故障后的电气量见表 3，可知，单端馈线 I_3 发

表 3　算例 3 中的电气量

Tab. 3 Electrical quantity in Case 3

电气量	幅值	电气量	幅值
U_{50}/V	363.75	$U^{-}+U^{0}$/V	18.00
$I_{A_1,h}$/A	4.87	$I_{B_1,h}$/A	4.87
$I_{B_2,h}$/A	6.01	$I_{D_1,h}$/A	6.01
$I_{D_2,h}$/A	7.37	$I_{F_1,h}$/A	7.37
$I_{F_3,h}$/A	1.40	$I_{H_1,h}$/A	1.40
$I_{A_2,h}$/A	4.87	$I_{C_1,h}$/A	4.87
$I_{C_3,h}$/A	3.80	$I_{E_1,h}$/A	3.80
$I_{E_2,h}$/A	2.78	$I_{G_1,h}$/A	2.78
$I_{G_2,h}$/A	1.81	$I_{I_1,h}$/A	1.81
$I_{B_3,h}$/A	1.20	$I_{C_4,h}$/A	1.00
$I_{D_3,h}$/A	1.30	$I_{E_3,h}$/A	1.00
$I_{F_4,h}$/A	1.40	$I_{G_3,h}$/A	0.97
$I_{H_3,h}$/A	1.40	$I_{I_3,h}$/A	1.80

生 A 相接地故障时，注入源 IIDG1 检测到工频电压幅值为 363.75 V，未跌落到检测阈值以下，工频电压跌落判据无效，但 IIDG1 的零、负序电压幅值和为 18 V，满足特征信号注入环节的启动判据。IIDG1 向微电网注入幅值为 10 A，频率为 250 Hz 的特征信号，IIDG2~IIDG4 根据特征信号幅值判据启动特征信号限流控制环节。I_3 处测得的特征信号幅值为 1.8 A，特征信号能够有效地流向故障点。

4.3 与现有方案的对比

表 4 给出了本文方案与现有研究的对比结果。文献[8]方案虽然使 IIDG 在故障期间仍具备支撑电压的能力，但其注入的特征信号为间谐波且不考虑 IIDG 的分流，故障馈线处测得的间谐波电流很小，增加了特征信号的提取难度；文献[9]通过改变 IIDG 的工作频率产生特征信号，但不支持低电压穿越，容易导致微电网的电压失稳；文献[10]采用多频率谐波电流的保护方法，也不考虑 IIDG 的分流，同样会导致注入式保护的性能不佳；文献[11]注入的谐波阶次为 23 次，导致特征信号通过 LCL 滤波器时发生明显衰减，故障馈线上检测到的特征信号含量较低。相比于文献[8-11]，本文所提方法可使 IIDG 在故障期间按照规约进行低电压穿越的同时注入一定强度的特征信号，且非注入源对特征信号呈高阻，故障馈线上可以检测到明显的特征信号，有利于微电网在安全稳定运行的前提下进行故障定位及清除。

表 4 所提保护方法与现有研究的对比

Tab. 4 Comparison of proposed protection method with existing research

方法	是否考虑 IIDG 分流	是否兼顾工频控制	是否考虑特征信号衰减
文献[8]	否	是	是
文献[9]	否	否	是
文献[10]	否	是	是
文献[11]	否	是	否
本文	是	是	是

5 结语

针对微电网中 IIDG 渗透率提高所带来的保护难题，提出了 1 种谐波分量注入式的微电网主动保护方法。该方案通过在主电源的电流环上叠加特征信号注入环节实现故障特征信号的主动注入；通过在从电源的电流环上叠加特征信号限流环节实现对特征信号的阻隔，从而使大部分特征信号流向故障点。研究表明，发生不同类型的故障时，本文所提注入方案均能启动特征信号注入，解决了非注入源对特征信号分流带来的保护方案失效问题，为注入式主动保护方案提供了很好的实际工程应用前景。但本文所提保护方法仅适用于规模较小的微电网，且对于注入源远端的对称高阻故障，本文所提注入方案可能会失效。下一步将研究适用于各种故障情况的注入控制策略并设计出相应的保护方案。

参考文献：

[1] 任晓琳，杨奕，高龙，等. 基于 IBA-KELM 模型的 TCT 光伏阵列故障诊断研究[J]. 电源学报，2023，21(5)：67-74.
Ren Xiaolin, Yang Yi, Gao Long, et al. Research on fault diagnosis of TCT photovoltaic array based on IBA-KELM model [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 67-74. (in Chinese)

[2] 吕玉坤，周庆文，魏子安，等. 积灰对光伏组件性能影响的试验研究及数值模拟[J]. 电源学报，2024，22(2)：175-182.
Lü Yukun, Zhou Qingwen, Wei Zian, et al. Experimental study and numerical simulation of influence of ash deposition on performance of photovoltaic modules [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 175-182. (in Chinese)

[3] Aghdam T S, Kazemi Karegar H, Zeineldin H H. Variable tripping time differential protection for micro-grids considering DG stability [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2407-2415.

[4] 薛士敏，崔淼. 基于形态学梯度算法的微电网行波保

护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 31-39.
Xue Shimin, Cui Miao. Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 31-39. (in Chinese)

[5] Liu Di, Dyśko A, Hong Qiteng, et al. Transient wavelet energy-based protection scheme for inverter-dominated microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2533-2546.

[6] 景柳铭, 王一博, 赵通, 等. 考虑光伏低电压穿越特性的交流微电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 54-60.
Jing Liuming, Wang Yibo, Zhao Tong, et al. AC micro-grid protection method considering photovoltaic low voltage ride through characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 54-60. (in Chinese)

[7] Dehghanpour E, Kazemi Karegar H, Kheirollahi R, et al. Optimal coordination of directional overcurrent relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1365-1375.

[8] El-Sayed W T, El-Saadany E F, Zeineldin H H. Interharmonic differential relay with a soft current limiter for the protection of inverter-based islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1349-1359.

[9] Soleimanisardoo A, Kazemi Karegar H, Zeineldin H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.

[10] Saleh K, Allam M A, Mehrizi-Sani A. Protection of inverter-based islanded microgrids via synthetic harmonic current pattern injection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2434-2445.

[11] 杨立明, 周浩亮, 朱振洪. 基于特征信号注入的含 IIDG 配电网谐波差动保护方案[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 181-187.
Yang Liming, Zhou Haoliang, Zhu Zhenhong. Harmonic differential protection scheme based on characteristic signal injection for distribution network with IIDG [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 181-187. (in Chinese)

[12] 华明, 管松敏, 朱永亮. 电网电压不平衡下星形级联 H 桥 STATCOM 的三相直流电压偏离控制策略[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 165-171.
Hua Ming, Guan Songmin, Zhu Yongliang. Three-phase DC voltage shift control strategy under unbalanced grid voltage for star-connected cascaded H-bridge STATCOM [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 165-171. (in Chinese)

[13] Standards Coordinating Committee 21. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power system: IEEE Std 1547-2003 [S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

[14] Liserre M, Blaabjerg F, Hansen S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1291.

[15] 史帅彬, 曾江, 康文韬, 等. 具有谐波抑制功能的电网电能质量最优控制方法[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 158-164.
Shi Shuaibin, Zeng Jiang, Kang Wentao, et al. Optimal control method for grid power quality with harmonic suppression function [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 158-164. (in Chinese)



薛林燚

作者简介：

薛林燚(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：微电网的故障控制。E-mail：2230672@tongji.edu.cn。

牟龙华(1963—　)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力系统保护与控制，分布式发电与微电网，电能质量。E-mail：lhmu@tongji.edu.cn。

徐瑞洁(2000—　)，男，硕士研究生。研究方向：微电网保护。E-mail：2230671@tongji.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)