

零序非工频分量注入式微电网接地故障保护方案

赵怀健,牟龙华,方重凯

(同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804)

摘要:微电网中含有大量的分布式电源,且具有很多不同于传统配电网的特点,传统配电网中的保护方案难以满足其对可靠性与稳定性的要求。基于微电网的结构和故障特点,建立了含多个逆变型分布式电源的微电网故障网络模型,提出了一种基于零序非工频分量注入的微电网接地故障保护方案。该方案利用注入的零序非工频电流产生的故障特征,能够正确识别并切除微电网内部各类接地故障,且同时适用于并网和孤岛2种运行方式。最后,在PSCAD/EMTDC软件中进行了仿真分析,结果验证了所提保护方案的有效性与可靠性。

关键词:微电网;继电保护;逆变型分布式电源;注入法;零序分量;非工频分量

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204013

0 引言

随着可再生能源发电技术的应用,分布式发电得到了迅速发展,而微电网作为一种将光伏发电、风力发电等分布式电源接入电网的有效手段,能充分发挥其技术优势,成为了未来能源链的关键技术之一^[1-4]。微电网既可以作为可控单元与大电网并网运行,也可以作为自治系统独立运行,有助于电网故障时对重要负荷继续供电,提高供电可靠性^[5-7]。

微电网中大部分的分布式电源都是以逆变器为接口接入电网,由于逆变器开关器件的热惯性较小,其能输出的故障电流仅能达到额定电流的1.2~2倍,使得微电网在故障情况下的故障特征难以提取^[8-9],因此微电网的保护面临着很大的挑战。针对微电网保护存在的问题,国内外已有相关文献进行了讨论。文献[10-11]提出了改进的反时限过电流保护方案。其中,文献[10]通过设置动态参数并引入改进的和声搜索算法对整定值进行优化配置,能够提升保护的选择性和快速性;文献[11]提出了多层级协同保护算法,根据差动电流进行故障分区,自适应配置不同区域的保护参数。文献[12-13]提出了自适应保护的概念,该方法能同时满足并网和孤岛2种运行方式,但是需要随着微电网状态的改变不断调整保护定值,实际应用较为复杂。此外,文献[14-16]提出了基于故障分量法的微电网保护方案,这些方案采用直接从故障参量中提取故障分量的方法,其幅值易受故障点过渡电阻的影响,不利于故障定位与切除,且由于微电网中的分布式电源输出受限,对外

表现为非线性,因此建立准确的故障分量等效模型定量分析较为困难,仍有待进一步完善。

本文结合计及控制策略的逆变型分布式电源IIDG(Inverter Interfaced Distributed Generator),建立了含多个IIDG的微电网模型,并对各馈线上的接地故障特征以及发生故障时PQ控制和V/f控制IIDG的输出特性进行了分析。根据叠加原理,建立了微电网的非工频分量附加网络,对不同位置发生接地故障时各母线及馈线上注入的非工频故障分量进行分析,提出了一种基于零序非工频分量注入的微电网接地故障保护方案。最后,利用PSCAD/EMTDC仿真软件建立了微电网的仿真模型,验证了所提信号注入控制及保护方案的有效性和可行性。

1 微电网模型的建立

根据IEEE 1547标准以及美国电力可靠性技术方案解决协会对微电网的定义^[17],并结合本文基于零序非工频分量注入的保护原理,建立如图1所示

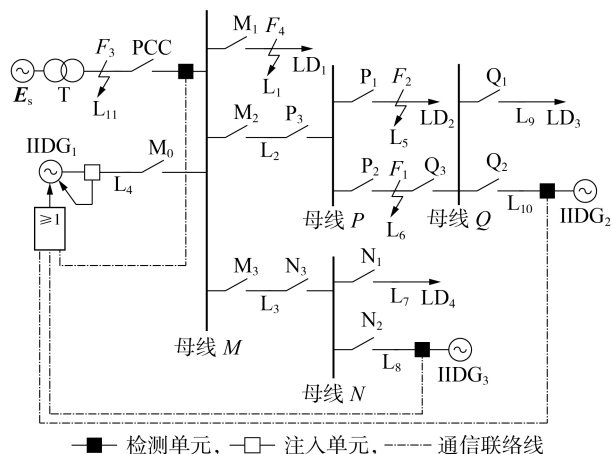


图1 含非工频分量注入源的微电网简化模型

Fig.1 Simplified model of microgrid with off-nominal frequency components injection source

收稿日期:2021-07-14;修回日期:2022-02-21

在线出版日期:2022-04-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22120210164)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(22120210164)

的含有多个IIDG的微电网简化模型。

图1中:微电网通过公共连接点PCC(Point of Common Coupling)与配电网相连实现并网运行;该微电网为三相三线制系统,通过升压变压器T接入配电网,变压器低压侧、负荷和不向微电网注入非工频特征信号的IIDG的中性点均不接地; E_s 为配电网电源电势;IIDG₁兼作非工频分量信号注入源,主从控制的微电网中IIDG₁采用V/f控制;LD₁—LD₄均为三相对称负荷; M_0 — M_3 、 N_1 — N_3 、 P_1 — P_3 、 Q_1 — Q_3 分别为母线M、N、P、Q处的分支馈线开关; L_1 — L_{11} 为馈线,其中 L_1 、 L_5 、 L_7 和 L_9 为单端馈出线,与2条母线相连的线路 L_2 、 L_3 和 L_6 为联络线,微电网与配电网之间的线路 L_{11} 为并网联络线, L_4 、 L_8 和 L_{10} 为连接各IIDG的馈线。

基于非工频分量信号注入的微电网保护方案整体流程如图2所示,其基本思路为:微电网发生故障后,信号注入启动检测环节发出控制信号,使IIDG₁立即向微电网注入频率为 f 的特征信号,各开关处的保护装置通过对该特征信号的检测与分析,实现故障定位与故障切除。

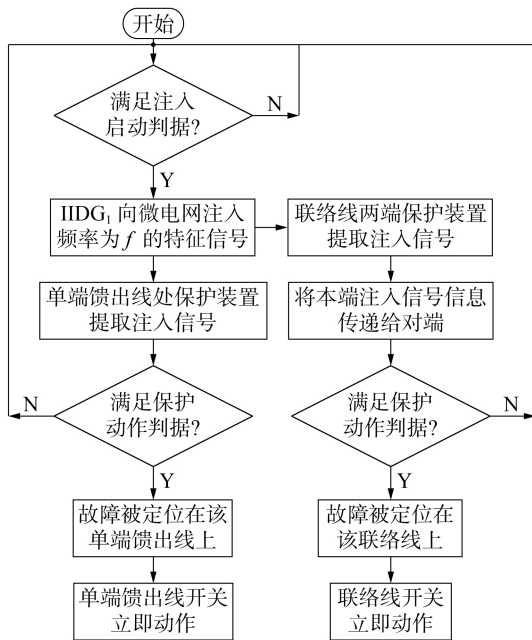


图2 微电网保护方案的简化流程图

Fig.2 Simplified flowchart of microgrid protection scheme

根据叠加原理和故障分量法^[18-19],可将图1分解为工频网络和注入信号作用下的附加网络,注入信号作用下的附加网络如图3所示。图中: $E_{inj,f}$ 和 $I_{inj,f}$ 分别为信号注入源的电压和电流; Z_{IIDG_1} 为注入源的等效阻抗; Z_s 为频率 f 下的系统等值阻抗; Z_1 — Z_4 分别为负荷LD₁—LD₄及其所连馈线在频率 f 下的等效阻抗; Z_{MN} 、 Z_{MP} 、 Z_{PQ} 为各联络线在频率 f 下的等效

阻抗; Z_{IIDG_2} 和 Z_{IIDG_3} 分别为IIDG₂和IIDG₃及其所连馈线在频率 f 下的等效阻抗; $I_{s,f}$ 为流向配电网的非工频电流; $I_{1,f}$ — $I_{13,f}$ 分别为各母线各出口处的非工频电流。设母线指向馈线的方向为电流的正方向,则各馈线故障电流的正方向如图3中箭头所示。

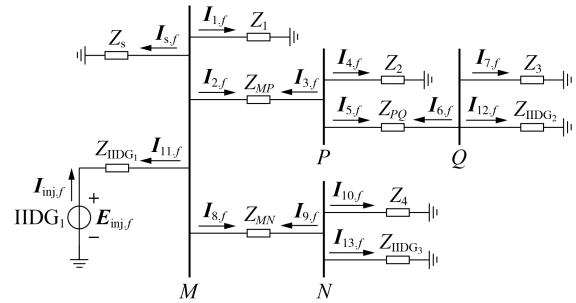


图3 频率为 f 的微电网附加网络

Fig.3 Additional network of microgrid under frequency f

2 注入特征信号的选择

2.1 注入特征信号的选型

根据电路原理可知,在频率为 f 的非工频特征信号的作用下,配电网和仅输出工频量的V/f控制的IIDG均等效为短路。故若注入正序或负序特征频率信号,则其将流向配电网或V/f控制的IIDG,不利于故障定位与选相。

考虑注入频率为 f 的零序特征信号:根据第1节的定义,图1中变压器低压侧和IIDG中性点均不接地,则配电网和V/f控制的IIDG对于注入的零序特征电流均等效为开路。此时,基于注入零序特征信号的零序附加网络如图4所示。

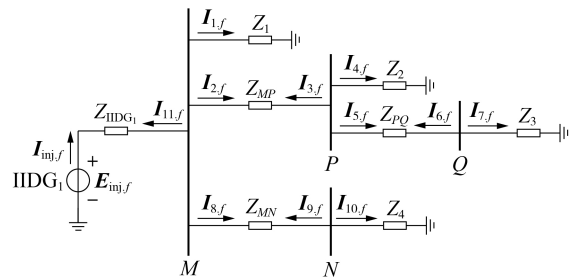


图4 频率为 f 的微电网零序附加网络

Fig.4 Zero-sequence additional network of microgrid under frequency f

2.2 注入特征信号的频率要求

由于IIDG出口滤波器和测量互感器的限制,注入的特征信号的频率应满足以下要求:

1) IIDG出口处的低通滤波器的截止频率一般为额定频率的10倍(即500 Hz)以上^[20],注入信号的频率应小于该截止频率,一般将注入频率的上限值设置为400 Hz;

2) 由于电流互感器的激磁阻抗与电流频率呈正

相关关系,因此,为防止保护误动或拒动,故障条件下,注入电流的频率应大于 50 Hz,从而降低激磁电流,保证电流互感器始终工作在其线性区域;

3)考虑到故障发生时,电网中会产生大量的整次谐波^[21],为了更准确地实现故障定位与故障切除,注入信号的频率不宜选择 50 Hz 的整数倍。

3 注入特征信号的控制方案

3.1 信号注入的启动判据

为了避免注入信号对正常运行的微电网产生不利影响,需设计信号注入的启动判据,确保仅在故障发生时向微电网注入特征信号。

由于正常运行的微电网中不含零序通路,故可通过注入源施加零序电压的方式进行探测式检测,即在正常运行时,IIDG₁持续向微电网施加一幅值较小、频率为 f 的零序电压。当发生接地故障时,微电网中将出现零序通路,故当 IIDG₁ 出口处的注入单元检测到零序电流时,说明发生了接地故障,进而向微电网注入幅值恒定、频率为 f 的零序电流。

同时,利用 IIDG₁ 出口处的电压降作为注入启动的补充判据。注入单元的启动检测工作原理如图 5 所示。图中: I_f 为 IIDG₁ 出口处测得的零序非工频电流幅值; $I_{f,set}$ 为该单元的零序非工频电流幅值的检测阈值; U_{IIDG_1} 为 IIDG₁ 出口处的工频电压幅值; $U_{IIDG_1,set}$ 为该单元的工频电压幅值的检测阈值。

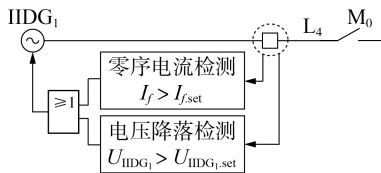


图 5 IIDG₁ 出口处的注入单元的启动检测原理图

Fig.5 Detection schematic of starting criterion of injection device at IIDG₁

微电网正常运行时不含零序电流,但为降低装置检测精度的影响,不失一般性,将 $I_{f,set}$ 整定为:

$$I_{f,set} = 0.02I_N \quad (1)$$

同时,将 $U_{IIDG_1,set}$ 整定为:

$$U_{IIDG_1,set} = 0.9U_N \quad (2)$$

式中: U_N 和 I_N 分别为系统的额定电压和额定电流的幅值。

上述检测方式采用了注入源的本地数据,具有快速性,但对于发生在距离注入源较远处的故障的灵敏性不高,因此需增加后备检测环节。如图 1 所示,后备检测单元分别安装在 PCC 和 IIDG₂、IIDG₃ 的出口处,其工作原理如附录 A 图 A1 所示。

类似地,对于负序电压分量检测环节,将能正确识别不对称故障的负序电压幅值的最小值 U_{set}^- 整定

为 $0.01U_N$ 。当检测到的负序电压 $U^- \geq U_{set}^-$ 时,说明可能发生了非对称性故障,该环节输出逻辑“1”,否则输出逻辑“0”。

由于上述检测方式无法正确识别三相接地故障,因此另设一电压幅值降落检测环节,并将检测阈值 $U_{M,set}$ 整定为 $0.9U_N$ 。当实际检测到的电压幅值 $U_M \leq U_{M,set}$ 时,说明可能发生了三相接地故障,该环节输出逻辑“1”,否则输出逻辑“0”。

为了准确检测各类接地故障,上述 2 个检测环节的逻辑输出需经过一次“或”运算后,作为检测装置的逻辑输出。同时,在注入启动信号接收处应另设一个“或”门处理各个检测单元发出的逻辑信号,并将处理结果作为信号注入的启动判据。

由于该检测单元含有逻辑运算并依赖于系统的通信功能,必须经过一定的时延才能将故障识别结果发送至注入源,故将其响应时间作为后备检测环节的时延,不再另设。

3.2 特征信号的注入控制

IIDG₁ 接收到注入启动信号后,通过其辅助控制环节,控制 IIDG₁ 向微电网注入幅值恒定、频率为 f 的零序电流 $I_{inj,f}$,辅助控制环节的基本结构如附录 A 图 A2 所示。该控制环节采用准 PR 控制器对 IIDG₁ 输出的工频信号和特征信号进行独立控制。通过准 PR 控制器,能够以恒流的形式输出零序特征信号,同时,工频信号采用直流电压外环和交流电流内环的双闭环控制方式,能够动态调节 IIDG₁ 的工频输出,保持其总输出功率不变。其中,准 PR 控制器^[22]的传递函数 $G_{PR}(s)$ 可表示为:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中: K_p 和 K_R 分别为准 PR 控制器的比例系数和谐振系数; ω_n 为准 PR 控制器的工作频率,一般设置为 $2\pi f \text{ rad/s}$; ω_c 为准 PR 控制器的截止频率,一般设置为 $2\pi \text{ rad/s}$ 。

4 故障的定位与切除

4.1 非工频电流的注入与提取

当注入启动检测装置检测到微电网内部发生故障后,向兼作特征信号注入源的 IIDG₁ 的辅助控制环节发出注入启动信号,控制 IIDG₁ 向微电网注入幅值恒定、频率为 f ($f \neq 50 \text{ Hz}$, 且 f 满足 2.2 节中对于注入频率的要求)的零序电流。

此外,本文方案在各个保护安装处均设置了数字保护继电器,用于注入的非工频电流的提取和保护的动作与切除,其主要由电流互感器、抗混叠滤波器、采样保持电路、模/数转换器、傅里叶变换以及微处理器组成,如附录 A 图 A3 所示。数字保护继电器的核心是注入信号的提取,电流互感器提取故障

电流后,经由滤波及模/数转换等环节,通过傅里叶变换分离出注入频率的电流,最后经微处理器处理后,实现故障定位与故障切除。为防止出现注入信号提取失败的问题,可引入后备保护方案,以增强保护的可靠性。

4.2 联络线上发生的故障

图1所示的微电网典型结构中, L_2 、 L_3 和 L_6 均为联络线。以 L_6 上 F_1 处发生故障为例,故障发生后,注入启动检测单元检测到微电网内部发生了故障,并通过辅助控制环节,控制IIDG₁向微电网注入幅值恒定、频率为 f 的零序电流。此时,注入电流作用下的微电网部分等效网络如附录A图A4所示,其中联络线采用差动保护方案。

为降低谐波及检测精度对保护动作的影响,需设置相应的保护动作阈值 ε ,一般整定为:

$$\varepsilon = \frac{1}{10} I_{inj,f} \quad (4)$$

式中: $I_{inj,f}$ 为IIDG₁向微电网注入的电流幅值。

因此,当 F_1 处发生故障时, L_6 上存在以下关系:

$$|I_{5,f} - I_{6,f}| > \varepsilon \quad (5)$$

式中: $I_{5,f}$ 和 $I_{6,f}$ 分别为线路 L_6 左、右端提取到的频率为 f 的电流幅值。式(5)表明,线路 L_6 仅一端检测到了注入电流,满足差动保护条件,两端的保护均动作。

对于线路 L_2 ,由于 F_1 处故障位于其下游,两端均可检测到注入电流,且有:

$$|I_{2,f} - I_{3,f}| < \varepsilon \quad (6)$$

式中: $I_{2,f}$ 和 $I_{3,f}$ 分别为线路 L_2 左、右端提取到的频率为 f 的电流幅值,线路 L_2 两端不满足差动保护条件。

类似地,线路 L_3 上有:

$$|I_{8,f} - I_{9,f}| < \varepsilon \quad (7)$$

式中: $I_{8,f}$ 和 $I_{9,f}$ 分别为线路 L_3 左、右端提取到的频率为 f 的电流幅值,线路 L_3 两端不满足差动保护条件。

本文方案对于联络线的保护基于差动保护的思想,结合非工频分量注入法,通过检测 and 对比联络线两端注入电流的幅值,得出保护判据:当联络线两端检测到的注入电流的幅值相等时,说明该故障为区外故障,保护不动作;当联络线两端检测到的注入电流的幅值不相等时,说明该故障为区内故障,线路两端的保护均动作。

4.3 单端馈出线上发生的故障

图1所示的微电网典型结构中, L_1 、 L_5 、 L_7 和 L_9 均为单端馈出线,由于单端馈出线仅有一端安装了保护装置,前文所述差动保护策略不再适用。以线路 L_5 上 F_2 处发生故障为例,故障发生后,注入启动检测单元检测到微电网内部发生了故障,并通过辅助控制环节,控制IIDG₁向微电网注入幅值恒定、频率为 f 的零序电流。此时,注入电流作用下的微电网部分

等效网络如附录A图A5所示。

当 F_2 处发生故障时,线路 L_5 上存在以下关系:

$$I_{4,f} \geq \varepsilon \quad (8)$$

式中: $I_{4,f}$ 为线路 L_5 左端提取到的频率为 f 的电流幅值。由于在发生故障时,大部分注入电流会流向短路点,而线路 L_5 上检测到的注入电流幅值大于动作阈值,说明发生了区内故障,保护动作。此时,线路 L_1 上有:

$$I_{1,f} < \varepsilon \quad (9)$$

式中: $I_{1,f}$ 为线路 L_1 左端提取到的频率为 f 的电流幅值。

由式(9)可知保护不动作。同理可得,单端馈出线 L_7 、 L_9 上的保护均不动作。

单端馈出线的保护判据总结如下:若在单端馈出线上检测到了注入电流,则说明发生了区内故障,保护动作;否则为区外故障,保护不动作。

另外,对于不向微电网注入非工频电流的IIDG₂和IIDG₃所在的线路 L_{10} 和 L_8 而言,上述保护判据亦成立。

针对上述微电网内部不同位置发生的故障,本文方案的保护判据都是基于故障相的故障特征建立的,因此不仅能够实现故障的定位与切除,还能根据各相电流是否满足保护动作条件实现故障选相。

4.4 注入的非工频电流的流向

根据2.1节所述,微电网的并网变压器低压侧中性点不接地,因此,当在并网状态下发生不对称接地故障时,非故障相注入的频率为 f 的电流会流经该变压器并最终流向故障相。以 F_4 处发生的A相接地故障为例,故障发生时,注入的频率为 f 的电流的流向如附录A图A6所示。因此,在发生不对称接地故障时,故障相的故障特征会更加明显,有助于故障定位与故障切除。

4.5 并网联络线上发生的故障

根据4.4节所述,对于并网联络线 L_{11} 而言,在微电网的并网运行状态下,无论 F_3 处是否发生故障,只要微电网内部发生不对称接地故障,非故障相的注入电流都会流经该联络线路,因此4.3节中的保护策略无法适用于 F_3 处发生故障的情况。

F_3 处发生A相接地故障时注入电流的流向如附录A图A7所示,故障发生时,并网联络线 L_{11} 上存在以下关系:

$$I_{0,f} \geq \varepsilon \quad (10)$$

式中, $I_{0,f} = |I_{A,f} + I_{B,f} + I_{C,f}|$, $I_{0,f}$ 为PCC处保护装置提取到的频率为 f 的三相电流相量 $I_{A,f}$ 、 $I_{B,f}$ 、 $I_{C,f}$ 和的幅值。

F_3 处发生故障时,并网联络线 L_{11} 上产生零序通路,PCC处保护装置将会检测到注入的三相非工频电流相量和的幅值 $I_{0,f}$ 满足判据式(10),说明并网联络线 L_{11} 上发生故障,保护动作。相对应地,如附录A

图 A6 所示,当并网联络线 L_{11} 未发生接地故障时,该线路上不存在零序通路,PCC 处保护装置检测到的三相非工频电流相量和的幅值 I_{0f} 为 0,保护不动作。

5 仿真验证

根据图 1 所示拓扑,在 PSCAD / EMTDC 软件中搭建了含有多个 IIDG 的微电网等效模型。并网运行模式下,IIDG₁—IIDG₃均采用 PQ 控制策略;而在孤岛运行模式下,将 IIDG₁切换至 V / f 控制策略,以支撑微电网内部的电压和频率。

上述微电网模型经 10 kV/35 kV 升压变压器连接到大电网,系统容量为 100 MV·A。LD₁—LD₄均为三相负荷,分别为 600+j50、650+j50、300+j20、600+j40 kV·A。IIDG₁—IIDG₃的有功参考功率分别设置为 600、500、500 kW,最大并网点电流设为 1.5 倍的额定并网点电流,分别为 70、55、55 A。注入的零序电流幅值为 20 A,频率为 325 Hz。保护动作阈值 $\varepsilon=2$ A。

1)算例 1: F_1 处发生单相接地故障(孤岛运行模式)。

$t=0.5$ s 时刻,图 1 中 F_1 处发生 A 相接地故障,接地电阻为 5 Ω 。故障发生后,IIDG₁立刻向微电网注入幅值为 20 A、频率为 325 Hz 的零序电流。此时,线路 L_6 两端检测到的频率为 325 Hz 的电流幅值如附录 A 图 A8 所示。由图 A8(a)可知,线路 L_6 左端检测到的频率为 325 Hz 的三相电流稳态幅值分别为 23、5、4 A;由图 A8(b)可知,线路 L_6 右端检测到的三相电流稳态幅值分别为 11、5、4 A。可见, F_1 处发生 A 相接地故障后,为零序电流提供了通路,由于短路点的存在,A 相注入的大部分频率为 325 Hz 的电流无法从线路 L_6 左端流至右端,A 相两端电流幅值之差为 23-11=12(A)> ε ,符合 4.2 节中的差动保护动作条件。

作为对比,若不采用零序非工频电流注入的方法,在上述故障发生时,线路 L_6 两端提取到的工频零序电流幅值见附录 A 图 A9。其中,线路 L_6 两端提取到的工频零序电流最大值分别为 2.6、0.7 A,最大差值仅为 2.6-0.7=1.9(A)。在这种情况下,提取到的工频零序电流幅值及两端差值均较小,易受检测精度及接地电阻大小的影响,可靠性及灵敏度较低。

2)算例 2: F_1 处发生两相接地故障(并网运行模式)。

$t=0.5$ s 时刻, F_1 处发生 AB 两相接地故障,接地电阻为 100 Ω ,IIDG₁向微电网注入幅值为 20 A、频率为 325 Hz 的零序电流。此时,线路 L_6 两端检测到的频率为 325 Hz 的电流幅值如图 6 所示。

由图 6(a)可知,线路 L_6 左端检测到的 325 Hz 的

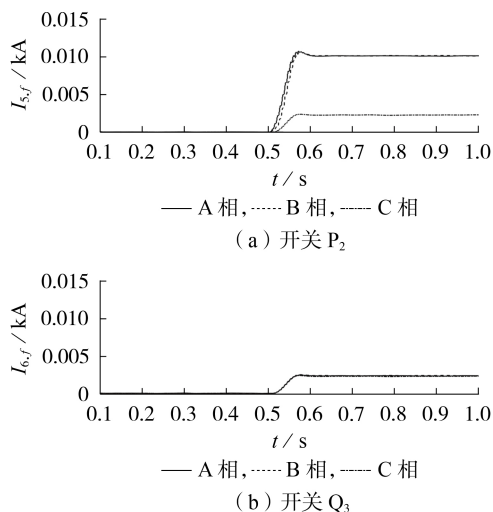


图 6 F_1 处发生 AB 两相接地故障时,线路 L_6 两端的注入电流幅值

Fig.6 Injection current amplitude at two ends of L_6 when AB-G fault occurs at F_1

三相电流稳态幅值分别为 10.1、10.1、2.3 A;由图 6(b)可知,线路 L_6 右端检测到的三相电流稳态幅值均为 2.3 A。可见, F_1 处发生 AB 两相接地故障后,为注入的零序电流提供了通路,且 C 相注入电流经由并网变压器后分流至 A、B 两相。由于短路点的存在,A、B 两相注入的大部分 325 Hz 的电流无法从线路 L_6 左端流至右端,A、B 两相两端电流幅值之差均为 10.1-2.3=7.8(A)> ε ,符合 4.2 节中的差动保护动作条件。

3)算例 3: F_2 处发生单相接地故障(并网运行模式)。

$t=0.5$ s 时刻, F_2 处发生 A 相接地故障,接地电阻为 0.1 Ω ,IIDG₁向微电网注入幅值为 20 A、频率为 325 Hz 的零序电流。此时,线路 L_5 左端检测到的频率为 325 Hz 的电流幅值如图 7 所示。

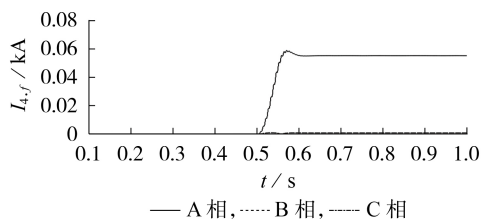


图 7 F_2 处发生 A 相接地故障时,线路 L_5 左端的注入电流幅值

Fig.7 Injection current amplitude at left end of L_5 when A-G fault occurs at F_2

由图 7 可知,线路 L_5 左端检测到的 325 Hz 的三相电流稳态幅值分别为 55、0.5、0.5 A。可见, F_2 处发生 A 相接地故障后,为注入的零序电流提供了通路,由于故障时大部分故障电流流向短路点,且 B、C 相

注入电流经由并网变压器汇入A相,线路 L_5 左端的A相电流幅值为 $55\text{ A}>\varepsilon$,符合4.3节中的保护动作条件。

此时,PCC处保护装置检测到的频率为 325 Hz 的三相电流相量和的幅值如附录A图A10所示。其中,PCC处保护装置检测到的频率为 325 Hz 的三相电流相量和的幅值为0。可见,当 F_2 处发生A相接地故障时,并联网络线 L_{11} 上不存在零序通路,故检测到的三相电流相量和的幅值为0,不符合4.5节中的保护动作条件。

4)算例4: F_3 处发生单相接地故障(并网运行模式)。

作为对比, $t=0.5\text{ s}$ 时刻, F_3 处发生A相接地故障,接地电阻为 $0.1\ \Omega$,IIDG₁向微电网注入幅值为 20 A 、频率为 325 Hz 的零序电流。此时,PCC处保护装置检测到的频率为 325 Hz 的三相电流相量和的幅值如附录A图A11所示。其中,PCC处保护装置检测到的 325 Hz 的三相电流相量和的幅值为 57 A 。可见,当 F_3 处发生A相接地故障时,并联网络线 L_{11} 上存在零序通路,检测到的三相电流相量和的幅值为 $57\text{ A}>\varepsilon$,符合4.5节中的保护动作条件。

5)算例5: F_2 处发生三相接地故障(并网运行模式)。

$t=0.5\text{ s}$ 时刻, F_2 处发生三相接地故障,接地电阻为 $10\ \Omega$,IIDG₁向微电网注入幅值为 20 A 、频率为 325 Hz 的零序电流。此时,线路 L_5 左端检测到的频率为 325 Hz 的电流幅值如附录A图A12所示。图中,线路 L_5 左端检测到的 325 Hz 的三相电流稳态幅值均为 13.5 A 。可见, F_2 处发生三相接地故障后,为注入的零序电流提供了通路,由于故障时大部分故障电流流向短路点,线路 L_5 左端的三相电流幅值均为 $13.5\text{ A}>\varepsilon$,符合4.3节中的保护动作条件。

上述仿真结果表明,本文方案能够正确识别微电网中可能发生的各类接地故障,能够正确选出内部故障的故障相,且通信带宽要求低。同时,保护动作阈值能够同时适用于并网和孤岛2种运行模式,具有良好的可靠性与适应性。

6 结论

本文提出了一种新的基于零序非工频分量注入的微电网接地故障保护方案,建立了注入频率下的微电网等效模型,通过对微电网中故障特征的分析,得出了如下结论:以注入的零序非工频电流作为微电网故障特征,对于微电网中可能发生的各类接地故障均能起到保护作用。且由于保护判据与微电网运行模式无关,因此该方案能够同时适用于微电网的并网和孤岛2种运行模式,无需跟随微电网运行模式的切换进行保护策略的调整,兼顾了保护方案

的可靠性与简洁性。通过PSCAD/EMTDC进行了仿真分析,验证了方案的可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李松,李建伟,董云飞,等. 多子微电网型交直流混合配电系统灵活功率控制与电压抑制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):99-106.
LI Song, LI Jianwei, DONG Yunfei, et al. Flexible power control and voltage suppression strategy for hybrid AC/DC distribution system with multi-microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 99-106.
- [2] 张善路,李磊,陈鹏威,等. 多智能体系统在微电网中的应用[J]. 南京理工大学学报,2021,45(2):127-141.
ZHANG Shanlu, LI Lei, CHEN Pengwei, et al. Application of multi-agent system in microgrid[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2021, 45(2): 127-141.
- [3] 李俊杰,吕振宇,吴在军,等. 基于电力电子变压器的交直流混合微电网运行模式自适应切换策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):126-131,138.
LI Junjie, LÜ Zhenyu, WU Zaijun, et al. Adaptive switching strategy of AC/DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 126-131, 138.
- [4] 张伟亮,张辉,支娜,等. 放射直流微电网短路故障保护策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):203-209.
ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Protection strategy of short circuit fault in radial DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 203-209.
- [5] 赵雨童,高飞,张博深. 基于交流电流下垂特性控制的VSC建模和稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):50-55.
ZHAO Yutong, GAO Fei, ZHANG Boshen. Modeling and stability analysis of VSC with droop characteristic based on AC current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 50-55.
- [6] 吴宇奇,叶雨晴,马啸,等. 抑制电压波动与规避频率越限的孤岛微电网并网预同步方案[J]. 电力系统自动化,2021,45(14):56-64.
WU Yuqi, YE Yuqing, MA Xiao, et al. Pre-synchronization scheme with voltage fluctuation suppression and frequency out-of-limit avoidance for grid connection of islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 56-64.
- [7] 王聪,颜伟,户秀琼. 考虑频率波动的孤岛微电网在线三相概率潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):109-116.
WANG Cong, YAN Wei, HU Xiuqiong. Online three-phase probabilistic power flow calculation method for islanded microgrid considering frequency fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 109-116.
- [8] AGHDAM T S, KAZEMI KAREGAR H, ZEINELDIN H H. Variable tripping time differential protection for microgrids considering DG stability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3):2407-2415.
- [9] 徐玉韬,吴恒,谈竹奎,等. 适用于微电网的变频继电器保护方案[J]. 电工技术学报,2019,34(S1):360-367.
XU Yutao, WU Heng, TAN Zhukui, et al. Research on variable-frequency based relay protection for micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 360-367.
- [10] 杨克杰,黄纯. 配电网反时限过电流保护优化整定方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):163-168.
YANG Kejie, HUANG Chun. Optimal setting method of in-

- verse time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 163-168.
- [11] 黄文焘, 邵能灵, 刘剑青, 等. 微电网多层次协同反时限保护方案[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 623-633.
HUANG Wentao, TAI Nengling, LIU Jianqing, et al. Multi-layer collaborative inverse-time protection schemes for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 623-633.
- [12] JAIN R, LUBKEMAN D L, LUKIC S M. Dynamic adaptive protection for distribution systems in grid-connected and islanded modes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 281-289.
- [13] PURWAR E, SINGH S P, VISHWAKARMA D N. A robust protection scheme based on hybrid pick-up and optimal hierarchy selection of relays in the variable DGs-distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 150-159.
- [14] 周涵, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的孤岛微电网保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 11-20.
ZHOU Han, MU Longhua, GUO Wenming. Islanded microgrid protection based on fault components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 11-20.
- [15] ZHANG F, MU L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4816-4826.
- [16] 戴明, 贾科, 方煜, 等. 独立运行微电网的故障特性分析及其线路保护研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 133-140.
DAI Ming, JIA Ke, FANG Yu, et al. Fault characteristic analysis and line protection research of independent microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 133-140.
- [17] Standards Coordinating Committee 21. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE Std 1547-2003[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [18] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
- [19] 孙玲玲, 王宁, 贾清泉, 等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 79-86.
SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 79-86.
- [20] 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.
- [21] 王晓寰, 庆宏阳, 刘聪哲, 等. 微电网孤岛运行模式下谐波电流抑制研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 167-176.
WANG Xiaohuan, QING Hongyang, LIU Congzhe, et al. Research on harmonic current suppression in islanded mode of micro-grid[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(3): 167-176.
- [22] 鲁改凤, 杜帅, 欧钰雷, 等. 自适应谐波消除的准PR并网逆变器优化控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 59-63.
LU Gaifeng, DU Shuai, OU Yulei, et al. Optimal control of quasi-PR grid-connected inverter with adaptive harmonic elimination[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 59-63.

作者简介:



赵怀健

赵怀健(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网保护与控制(E-mail: lincin@tongji.edu.cn);

牟龙华(1963—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为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);

方重凯(1998—),男,博士研究生,主要研究方向为微电网及智能配电网的保护与控制(E-mail: 2011248@tongji.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Grounding fault protection scheme based on zero-sequence off-nominal frequency component injection for microgrid

ZHAO Huaijian, MU Longhua, FANG Chongkai

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Microgrids contain many distributed generators, and have many characteristics different from those of traditional distribution network. The protection schemes for traditional distribution network are difficult to meet the requirements of microgrid operation. Based on the topology and fault characteristics of microgrid, a microgrid fault network model with multiple inverter interfaced distributed generators is established, and a grounding fault protection scheme for microgrid based on zero-sequence off-nominal frequency component injection is proposed. With the fault characteristics generated by the injected zero-sequence off-nominal frequency current, the scheme can correctly identify and remove all kinds of grounding faults in microgrid, and is suitable for both grid-connected and islanded modes. Finally, the proposed protection scheme is analyzed and simulated in PSCAD/EMTDC, the results verify the effectiveness and reliability of it.

Key words: microgrid; relay protection; inverter interfaced distributed generator; injection method; zero-sequence component; off-nominal frequency component

附录 A

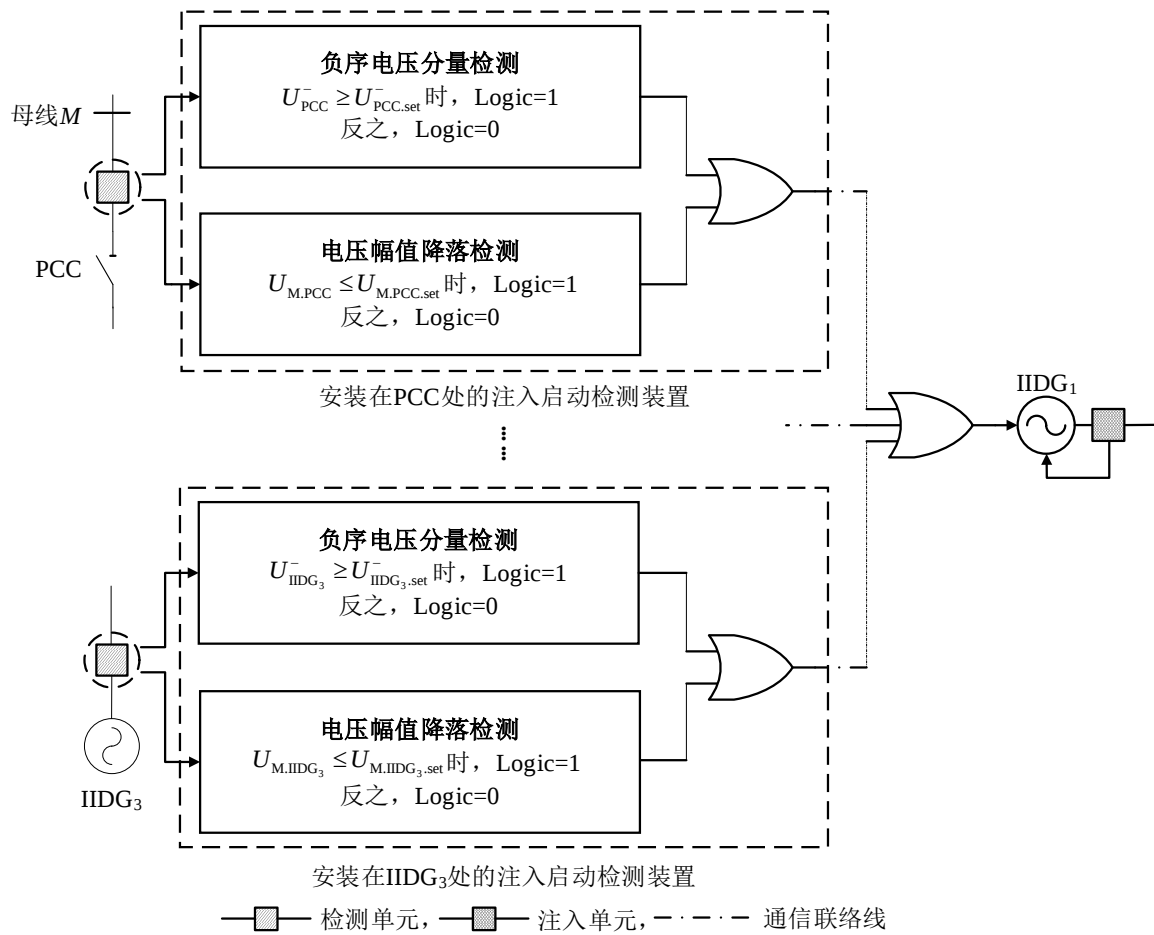


图 A1 后备检测单元原理图

Fig.A1 Schematic of backup detection device

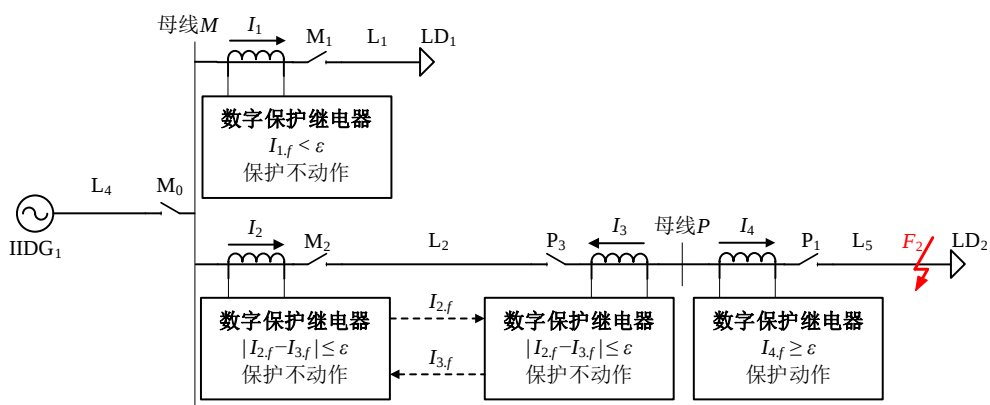


图 A5 单端馈出线故障时微电网部分等效网络

Fig.A5 Equivalent network under single-terminal branch feeder fault

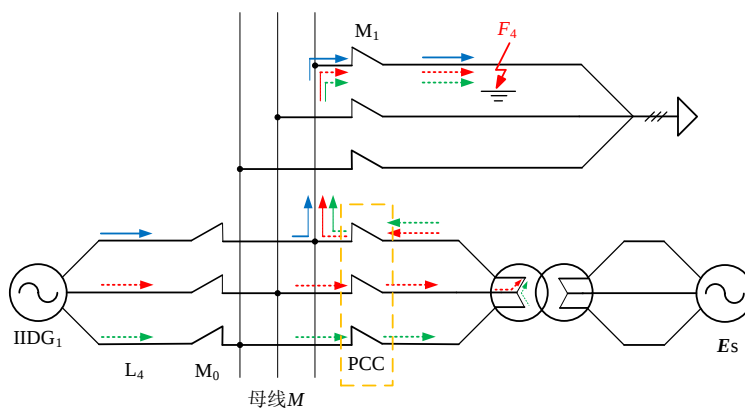


图 A6 F_4 处发生 A 相接地故障时注入电流的流向

Fig.A6 Direction of fault current under A-G fault at F_4

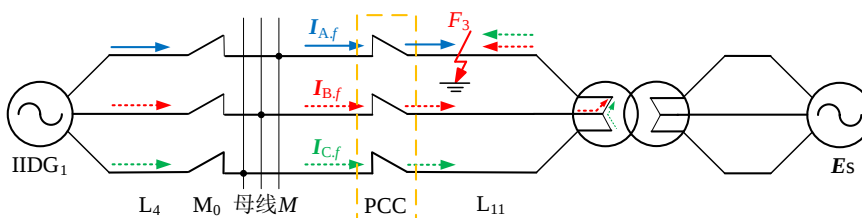
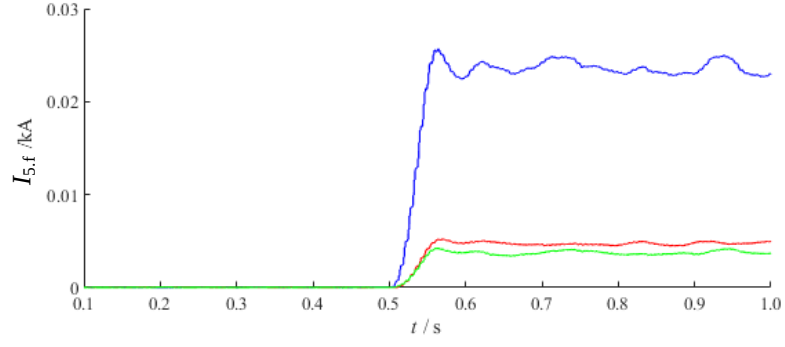
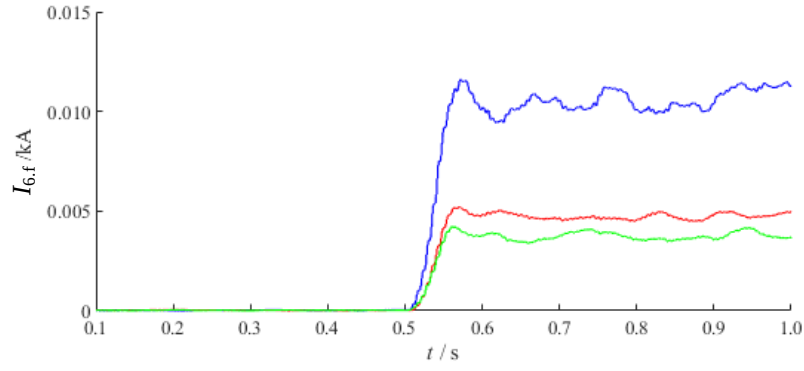


图 A7 F_3 处发生 A 相接地故障时注入电流的流向

Fig.A7 Direction of fault current under A-G fault at F_3



(a) 开关 P_2



(b) 开关 Q_3

图 A8 A 相接地故障时线路 L_6 两端的注入电流幅值

Fig.A8 Injection current amplitude at two ends of L_6 under A-G fault

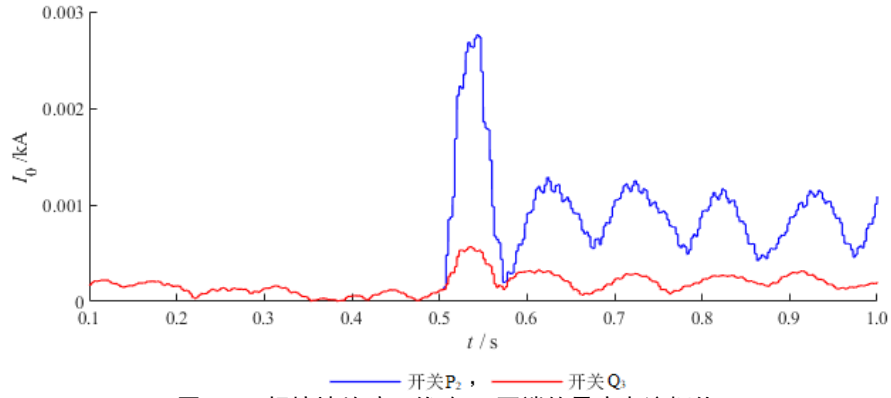


图 A9 A 相接地故障下线路 L_6 两端的零序电流幅值

Fig.A9 Zero-sequence current amplitude at two ends of L_6 under A-G fault

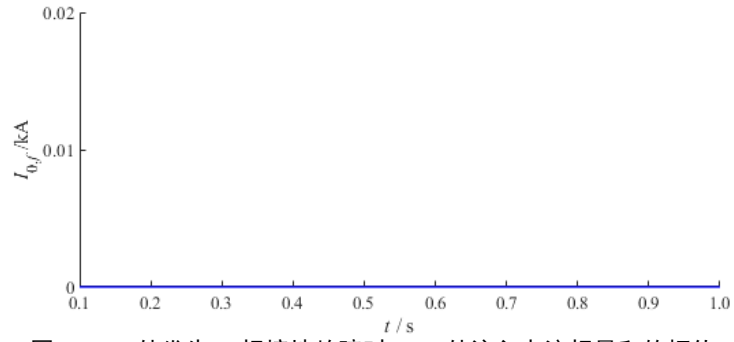


图 A10 F_2 处发生 A 相接地故障时 PCC 处注入电流相量和的幅值

Fig.A10 Amplitude of sum of injection current phasors at PCC under A-G fault at F_2

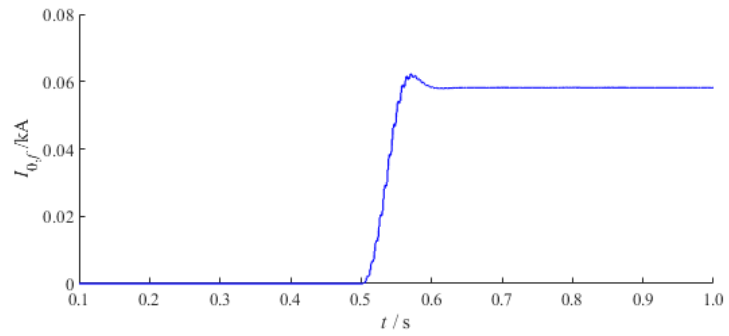


图 A11 F_3 处发生 A 相接地故障时 PCC 处注入电流相量和的幅值

Fig.A11 Amplitude of sum of injection current phasors at PCC under A-G fault at F_3

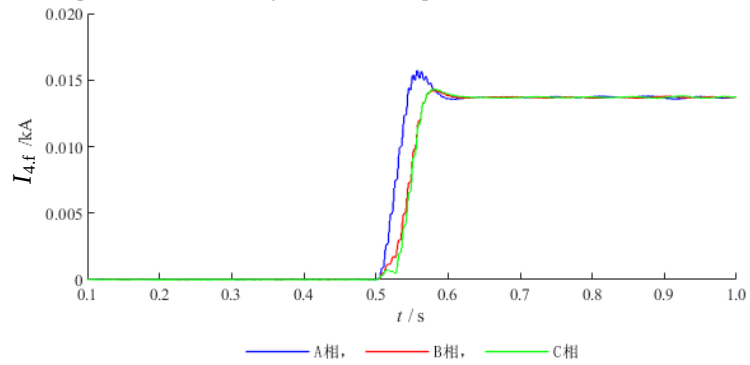


图 A12 三相接地故障下线路 L_5 左端的注入电流幅值

Fig.A12 Injection current amplitude at left end of L_5 under ABC-G fault