

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.012

# 基于等效距离的源网储微电网故障保护方法

周前, 朱丹丹, 汪成根

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**随着能源与环境问题日益严重,以可再生能源为核心的分布式发电技术发展迅速。基于逆变器电源的微电网是分布式发电的重要组成形式,但其内部网络发生短路故障后难以有选择性地准确隔离故障,会造成整体停运。针对逆变器电源特点及微电网结构,提出一种基于等效距离的源网储微电网线路保护方法。将线路在发生故障之后的故障信息通过调制技术来调制到线路的频率中,进而通过解调技术获得虚拟短路电流,并通过等效内电势测出故障距离。通过理论分析与仿真实验,验证了在4种不同电路结构情况下,包括单电源回路等,使用该方法都能算到虚拟短路电流,其相当于传统旋转电机作为电源时所输出的虚拟电流,并根据此虚拟短路电流测出逆变器电源和故障点间的距离。

**关键词:**新型电力系统;继电保护;微电网;逆变器;等效距离;虚拟电流

**中图分类号:** TM771

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)02-0113-11

## 0 引言

近年来,因化石燃料过度使用而引发的环境和能源问题日趋严重,用可再生能源替代化石燃料,成为各个国家能源安全所关注的重点。微电网是包含负载和分布式电源的电能量分配系统<sup>[1]</sup>,协调并可控地在并网或孤岛2种状态下运行<sup>[2]</sup>。

若微电网处于孤岛模式下,当其内部出现故障时,故障点测得的故障电流全部来源于逆变器电源<sup>[3]</sup>。微电网是由多种能源和负载组成的小型电力系统,电源部分通常由可再生能源发电设备(如光伏)和储能设备所组成。但因逆变器电源自身特殊的结构,为保障器件的安全,通常会在发生故障后自动闭锁或限幅其输出,不能向故障点提供足够的持续且稳定的故障电流,很难实现保护的选择性、灵敏性、可靠性和速动性。若微电网处于并网模式下,发生大扰动后微电网也须解列并形成孤岛运行,从而提高微网与大电网的可靠性<sup>[4]</sup>。可见,为了保障微电网的安全运行,针对其内部的结构特点而提出有效的保护方法十分必要。

目前,微电网的继电保护的设计和配置主要存在两方面的困难:(1)逆变器电源内部含有的电力电子器件只能承受较小的故障电流,在故障电流较大时,为保证器件不被损坏,保护装置会闭锁或限幅逆变器电源的输出,受限后的输出故障特征对于传统的继电保护不再明显,继电保护装置将难以检测到明显的故障信息<sup>[5]</sup>;(2)与传统电网相比,微电网的覆盖范围很小,为保证只精确地切除故障部

分,以最大限度地减小故障的影响范围,须考虑如何提高继电保护装置的选择性<sup>[6]</sup>。

文献[7]分析逆变器电源在微电网出现故障后的输出特性,并根据其输出特性提出相应的过流保护方法。文献[8]根据继电保护可靠性、灵敏性的要求,在现有保护的基础上设计电流电压连锁速断保护,并分析其可行性。文献[9]分析故障发生时逆变器电源的输出特性,并进一步根据微电网故障后的方向信息提出相应的保护策略。目前多是针对处于稳态控制模式下的逆变器电源,故而这些研究只适用于微电网处于不正常状态,或故障点距离逆变器电源较远时,具有很大的局限性。且在微电网内部发生故障时,为了保证内部的电力电子器件不被损坏,逆变器电源的输出将受限,对于传统继电保护装置,故障特征不再明显<sup>[10]</sup>。

文中提出一种基于逆变器等效距离的微电网线路保护方法,基于微电网的约束条件划分其运行状态,确定运行状态间的转换判据;提出一种通过获取故障信息来准确测量逆变器电源和故障点间距离的保护方法,可最大限度地利用现有继电保护装置;提出基于逆变器等效测距技术的微电网线路保护方法,通过虚拟故障电流环节来获取故障信息量,实现故障点和逆变器电源间测距;对比分析传统旋转电机和逆变器电源在故障后得到的故障信息,验证了文中所提保护方法的可行性。

## 1 微电网的运行

### 1.1 微电网运行控制特性

在并网模式下,微电网相当于大电网的一个电

源或负荷;在孤岛模式下,微电网可以控制内部逆变器电源的输出,从而时刻满足内部负荷的需要,此时微电网作为一个独立的系统运行<sup>[11]</sup>。微电网能够在满足区域用户用电需求的同时维持区域的电压稳定,还可以最大限度地利用当地的可再生资源,进而促进传统电网架构更新,促进我国的能源转型<sup>[12]</sup>,推动传统电网向智能电网转变<sup>[13]</sup>。

并网模式下,为最大限度利用可再生能源,一般设定逆变器电源采用 PQ 控制(即有功无功控制)或倒下垂控制<sup>[14]</sup>。孤岛模式下,逆变器电源须保持整个微电网系统的频率和电压在额定值附近允许的范围内波动,逆变器电源一般采用 V-f 控制(即恒压恒频控制)作为主控,同时作为平衡节点,而其余逆变器电源仍旧采用 PQ 控制或倒下垂控制<sup>[15]</sup>。

在传统配电网中,一般负载实时变化且不可控,旋转电机实时追踪负载的变化来调整自身的出力,而在微电网中,当逆变器电源输出无法满足负载需要时,会切除一些非重要的负载以保证重要负载的供电安全<sup>[16]</sup>。微电网运行状态的影响因素有:(1)微电网的运行模式;(2)逆变器电源的运行状态;(3)各种故障;(4)微电网内部的负荷变化<sup>[17]</sup>。

### 1.2 微电网线路故障分析

因逆变器电源的特殊结构等问题,使得传统的继电保护无法在微电网发生故障之后获取明显的故障信息量,进而无法及时切除故障。现有的一些关于微电网保护的研究都是基于传统继电保护方法<sup>[18]</sup>,工程性和实用性较差。而微电网和外部大电网唯一的区分是微电网采用了逆变器电源作为内部的能量输出端,故须分析逆变器电源的结构,进而对微电网的故障特性进行研究<sup>[19]</sup>。

孤岛模式下,微电网作为一个独立可控的系统存在,其内部的负荷需要完全由其内部的逆变器电源来满足<sup>[20]</sup>。并网模式下,微电网作为一个负荷或电源的形式存在,微电网系统会根据其需要从外部大电网获取或输送电能。微电网中的逆变器电源相对较为分散,其供电状态为多电源。微电网中的逆变器电源的种类和安装位置等都会对其继电保护产生影响,其和传统配电网的差别在于:微电网内的潮流呈双向流动的特点,微电网中助流作用和分流作用明显。

孤岛模式又可分为计划孤岛和非计划孤岛 2 种<sup>[21]</sup>。通常,非计划孤岛指在发生故障时,为最大程度地保障非故障部分的继续安全可靠运行而造成的公共连接点(point of common coupling, PCC)意外自动断开。这种非计划孤岛状态的出现条件较

为随机,且认为此时的微电网不具有自愈能力,即微电网不能通过自主控制来恢复到正常状态。计划孤岛是指在微电网正常时,因检修等原因,有计划地进行将微电网和外部大电网间的 PCC 断开。这种孤岛状态是有计划地进入孤岛状态,因此可以保证敏感负荷的供电安全,认为此种孤岛模式具有故障恢复能力<sup>[22]</sup>。

文中提出一种基于逆变器等效测距技术的微电网线路保护方法,针对微电网内部的故障进行保护控制。为了便于分析,认为此时微电网的孤岛状态均为计划孤岛,即此时的微电网具有自愈能力,能通过自主控制恢复到正常状态。

## 2 逆变器的等效距离原理

基于逆变器等效距离的微电网线路保护方法:微电网发生故障后,逆变器电源由正常状态的恒压输出变成恒流输出,同时将故障信息量调制到频率中进行变频输出,再通过相应装置进行解调以获得和传统旋转电机等效的虚拟短路电流,变频输出将传统保护中反映故障信息的电流增量调制到频率中去,从而保证逆变器电源输出不越限的同时输出故障信息,并通过保护装置解调重新获得虚拟短路电流量,该值与旋转电机相同线路阻抗条件下的短路电流值接近。原本因逆变器电源存在而不够明显的故障信息量将变得和传统旋转电机存在时一样明显,传统的继电保护可根据该故障量正确动作。

### 2.1 测量虚拟短路电流

基于逆变器等效距离的微电网线路保护方法是一种微电网线路保护的技术,其原理在于使用逆变器的等效距离作为基础。当微电网发生故障时,逆变器的电源模式从通常的恒压输出切换为恒流输出。与此同时,故障信息被嵌入输出频率中,实现了频率变化的输出。频率能够通过调制反映线路阻抗的大小,此时线路中的保护装置就可以根据采样到的频率值重新获取一个虚拟短路电流,其频率为 50 Hz,继而幅值反映线路阻抗的大小。传统的继电保护就能够根据该故障量正确动作。图 1 为单个逆变器电源接入故障后线路示意。

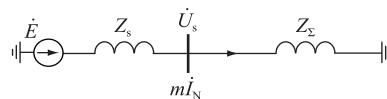


图 1 单个逆变器电源接入故障后线路示意  
Fig.1 Circuit schematic diagram of single inverter after power supply failure

图 1 中,  $Z_s$  为内阻抗;  $Z_L$  为线路阻抗;  $\dot{E}$  为额

定电压,作为类比的旋转电机电源能够始终保持输出相电压 $\dot{E}$ ;  $\dot{U}_s$ 为输出端电压; $I_N$ 为额定电流,逆变器电源输出最大值为 $m$ 倍的额定电流, $m$ 根据逆变器电源硬件条件进行取值,一般为1.5~2。

图1中的线路阻抗为:

$$Z = Z_s + Z_\Sigma = Z_s + \frac{\dot{U}_s}{mI_N} \approx Z_s + \frac{U_{sm}}{mI_N} \quad (1)$$

式中: $U_{sm}$ 为输出端的电压幅值。

紧接着,计算虚拟短路电流:

$$I^* = \frac{\dot{E}}{Z_s + Z_\Sigma} \approx \frac{E}{Z_s + Z_\Sigma} = \frac{E}{Z_s + U_{sm}/(mI_N)} \quad (2)$$

虚拟短路电流与参考频率 $f_{ref}$ 的调制关系为:

$$I^* = mI_N + k(f_N - f_{ref}) \quad (3)$$

式中: $k$ 为调制系数; $f_N$ 为工频,取50 Hz。

进一步,通过式(3)能够得到参考频率,如式(4)所示。

$$f_{ref} = f_N - (I^* - mI_N)/k \quad (4)$$

根据逆变器电源自身的输出限制,得到参考输出电流幅值为:

$$I_{ref,m} = mI_N \quad (5)$$

在经过调制以后,逆变器电源在故障后输出幅值恒定但频率变化的电流量,经过解调,可以得到虚拟短路电流:

$$I^* = I_m + k(f_N - f) \quad (6)$$

式中: $f$ 为线路中的实测频率; $I_m$ 为线路中的实测电流幅值。

微电网处于非故障状态时,线路中的实测频率 $f = f_N$ ,可得虚拟短路电流量 $I^* = I_m$ ,即等于正常线路中的电流量;微电网处于故障状态时,通过线路中的实测频率值,可得到虚拟短路电流量,该值与传统旋转电机存在时的故障电流值相同。

根据三相参考电流,逆变器电源故障后的输出便能实时追踪三相参考电流以输出故障信息量。

根据式(3)得到的虚拟短路电流 $I^*$ ,可以计算得到故障发生的地点和逆变器电源间的距离:

$$L = (E'/I^* - Z_s)/z_1 \quad (7)$$

式中: $E'$ 为等效内电势; $z_1$ 为线路上的单位长度阻抗。文中输电线路模型视为“一字型”,即线路长度和单位长度阻抗的乘积为线路阻抗值。

## 2.2 基于等效测距的保护功能设计

根据三相参考电流,逆变器电源故障后的输出便能实时追踪三相参考电流以输出故障信息量。

文中所提出的基于逆变器等效测距技术的微电网线路保护<sup>[23]</sup>的装置包括继电保护装置和故障

后可变频输出的逆变器电源两部分,如图2所示。

图中, $K$ 为短路故障点; $S$ 为开关; $i$ 为实测电流; $\dot{U}$ 为实测电压; $i_{ref}$ 为调制后得到的虚拟短路电流;VSC为电压源型换流器。

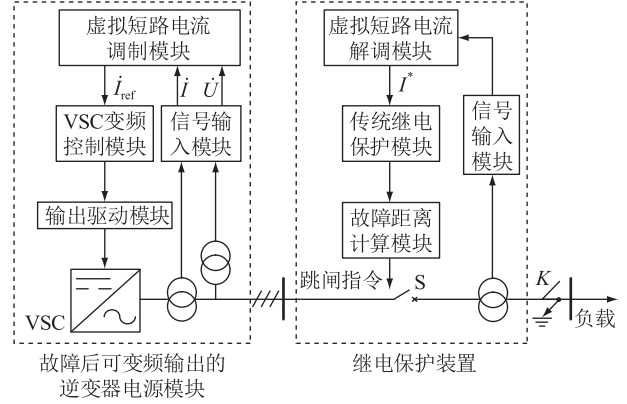


图2 等效测距继保装置结构

Fig.2 Structure of equivalent ranging relay protection device

虚拟短路电流解调模块结构如图3所示。

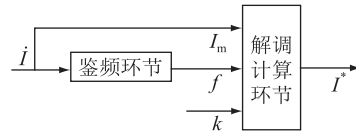


图3 虚拟短路电流解调模块

Fig.3 Virtual short-circuit current demodulation module

虚拟电流调制模块通过采集线路中的电流和频率信息,计算出虚拟短路电流,该值接近于电源为旋转电机的相同线路条件在同一点发生故障时的故障电流量。接着,故障距离测量模块接收虚拟电流调制模块计算得到的虚拟短路电流量,为计算故障距离做准备。

微电网发生故障<sup>[24]</sup>之后,采用等效测距继电保护能够获得故障信息足够明显的虚拟短路电流,并测量出故障距离,相较于传统继电保护优势明显。

## 3 微电网等效测距保护的仿真分析

在PSCAD/EMTDC平台上搭建了4种具有代表性的电路结构:单电源单回路供电、单电源双回路供电、两端供电和单端双电源供电。设定的故障均为三相短路故障,在故障发生前后A、B、C三相的电压和电流的变化完全相同,唯一的差别在于相位的不同。在后续仿真分析中,均以A相的电压和电流变化为例来分析三相的变化。

### 3.1 单电源单回路供电

图4为在PSCAD/EMTDC平台上搭建的单电源单回路供电的电路结构。图中M为旋转电机;

DG 为逆变器电源; $L_1$ 、 $L_2$  为线路感抗。

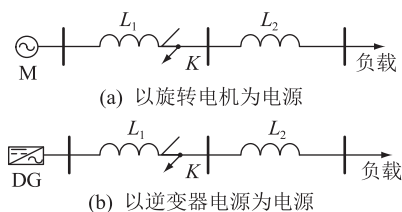


图 4 单电源单回路供电仿真模型示意

Fig.4 Schematic diagram of single power supply and single circuit power supply simulation model

图 4(a) 和(b)除了供电的电源不同,回路的其余部分及故障的设置均相同。电路的设置为:旋转电机在整个过程中的输出相电压始终保持为 220 V;逆变器电源在故障发生前和故障消除后,通过电压滞环控制保持输出相电压始终为 220 V,在故障期间,通过电流滞环控制保持输出电流幅值始终为 40 A;故障发生在 0.2 s,故障类型为三相短路故障,故障的切除发生在 0.4 s。

图 5 为旋转电机在整个过程的端口电压和电流的变化情况。

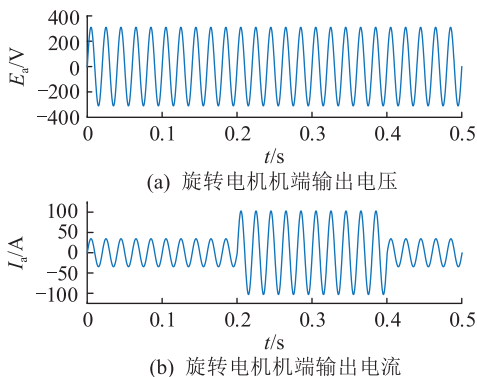


图 5 旋转电机机端输出电压、电流波形

Fig.5 Output voltage and current waveforms of rotating motor terminal

由图 5(a)可知,在故障前后,旋转电机的输出相电压始终为 220 V。由图 5(b)可知,故障发生前,旋转电机输出的电流在 35 A 左右;在 0.2 s 三相短路故障发生后,故障电流达到 103 A 左右;故障切除后,旋转电机输出电流重新恢复到 35 A 左右。旋转电机作为电源,发生故障时产生的故障信息量对于传统继电保护足够明显,能够及时测量出电源和故障点间的距离,并动作于保护装置进行切除故障。

图 6 为逆变器电源在整个过程的输出电压、电流、频率和虚拟短路电流的变化情况。

由图 6(a)可知,在故障发生前和故障切除后,逆变器电源在恒压控制的作用下,输出相电压保持为 220 V,频率为工频(即 50 Hz)。由图 6(b)可知,

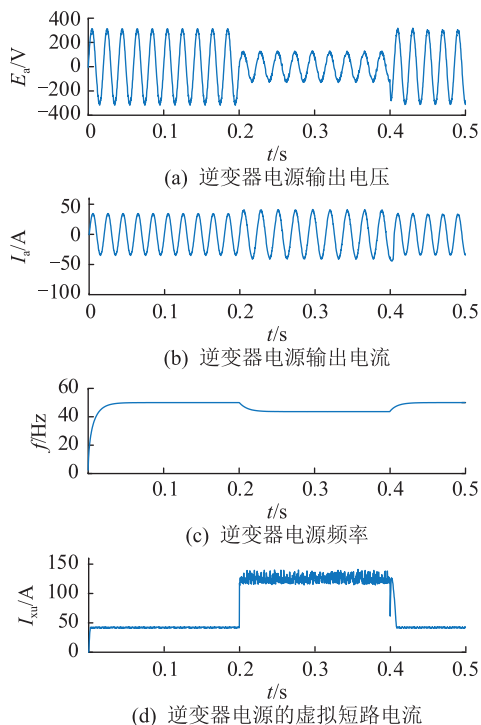


图 6 逆变器电源输出电压、电流、频率和虚拟短路电流波形

Fig.6 Output voltage, current, frequency and virtual short-circuit current waveforms of inverter power supply

故障发生前,逆变器电源输出的电流为 35 A 左右,处于逆变器中的电力电子器件可承受的范围;在 0.2 s 三相短路故障发生后,逆变器电源因切换到恒流控制模式,因此保持故障电流的幅值为 40 A 输出;故障切除后,逆变器电源恢复到恒压控制,输出的电流重新恢复到 35 A 左右。由图 6(c)可知,由于故障信息量被调制到频率中输出,故在故障期间电路中的频率发生变化,由工频变到 45 Hz 左右。由图 6(d)可知,经过解调模块得到的虚拟短路电流在故障期间幅值足够高。

图 7 为旋转电机短路电流和解调得到的虚拟短路电流对比和测得的逆变器电源和故障点间的等效距离。

经过仿真分析可知:在整个过程中,得到的虚拟短路电流和旋转电机短路电流高度吻合,且根据虚拟短路电流测量出了逆变器电源和故障点间的距离,传统继电保护可根据该值动作于跳闸装置切除故障。

### 3.2 单电源双回路供电

图 8 为在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建的单电源双回路供电的电路结构, $L_s$  为线路感抗。

图 8(a) 和(b)除了供电的电源不同,回路的其余部分及故障的设置均相同。电路的设置为:旋转电机在整个过程中的输出相电压始终保持为 220

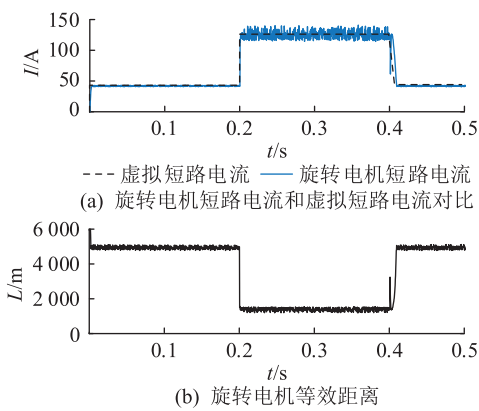


图7 旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比及等效距离(单电源单回路供电线路)

Fig.7 Comparison of short circuit current and virtual short circuit currents of rotating motor, and equivalent distance (single power supply single circuit power supply line)

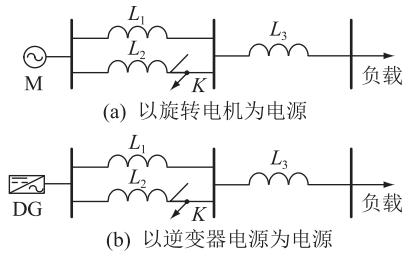


图8 单电源双回路供电仿真模型示意

Fig.8 Schematic diagram of single power supply and double circuit power supply simulation model

V;逆变器电源在故障发生前和故障消除后,通过电压滞环控制保持输出相电压始终为 220 V,在故障期间,通过电流滞环控制保持输出电流幅值始终为 40 A;故障发生在 0.2 s,故障类型为三相短路故障,故障的切除发生在 0.4 s。

图 9 为旋转电机在整个过程的端口电压和电流以及三处线路上的电流的变化情况。

由图 9(a)可知,在故障前后,旋转电机的输出相电压始终为 220 V。由图 9(b)可知,故障发生前,旋转电机输出的电流在 23 A 左右;在 0.2 s 三相短路故障发生后,故障电流达到 384 A 左右;故障切除后,旋转电机输出的电流重新恢复到 23 A 左右。旋转电机作为电源发生故障时产生的故障信息量对于传统继电保护足够明显,能够及时测量出电源和故障点间的距离,并动作于保护装置进行切除故障。由图9(c)一(e)可知,因 2 条回路的阻抗近似相等,因此,故障前 1,2,3 处的电流值近似相等。在发生三相短路故障后,三处的故障电流幅值达 306 A 左右,故障切除后,各处的电流又恢复到故障前的值。

图 10 为逆变器电源在整个过程的端口电压、电

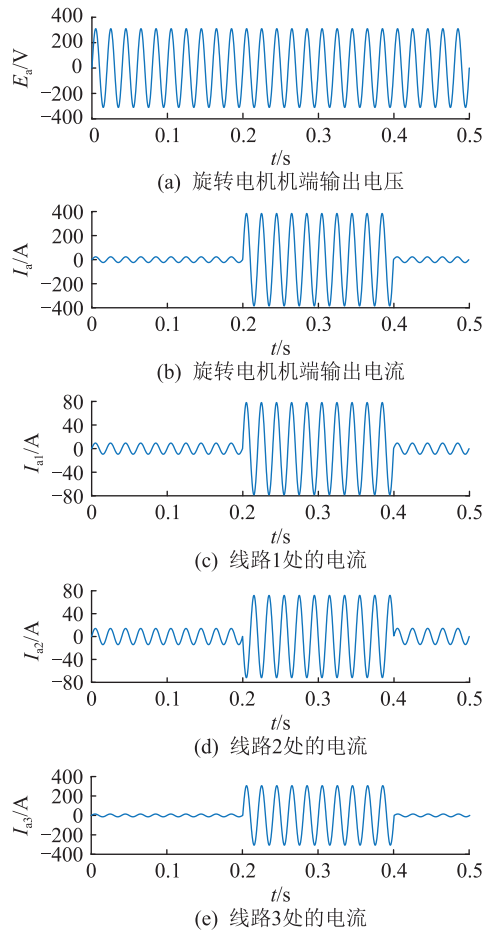


图9 旋转电机机端输出电压、电流和线路上三处电流波形

Fig.9 Output voltage, current of rotating motor and waveforms at three locations on the circuit

流、频率以及线路上三处电流和对应的虚拟短路电流的变化情况。

根据图 10(a),系统正常时,逆变器电源在恒压控制的作用下,输出相电压保持为 220 V,频率为工频(即 50 Hz)。由图 10(b)可知,故障发生前,逆变器电源输出的电流为 35 A 左右,处于逆变器中的电力电子器件可承受的范围内;在 0.2 s 三相短路故障发生后,逆变器电源因切换到恒流控制模式,因此保持故障电流的幅值为 40 A 输出;故障切除后,逆变器电源恢复到恒压控制,输出的电流重新恢复到 35 A 左右。由图 10(c)可知,由于故障信息量被调制到频率中输出,故在故障期间电路中的频率发生变化,由工频变到 17 Hz 左右。由图 10(e)一(i)可知,经过解调模块得到的虚拟短路电流在故障期间幅值足够高。

图 11 为线路上三处旋转电机短路电流和解调得到的虚拟短路电流对比以及根据虚拟短路电流测得的逆变器电源和故障点间的等效距离。

经仿真分析可知:在整个过程中,得到虚拟短路电流和旋转电机短路电流高度吻合,且根据虚拟

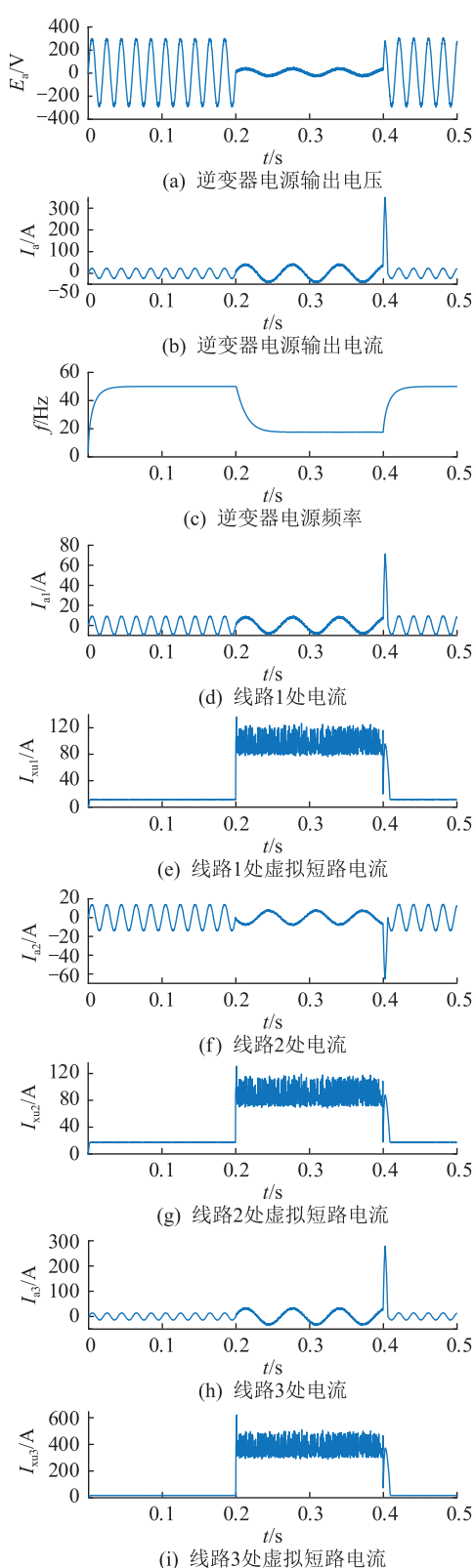


图 10 逆变器电源输出电压、电流、频率和线路上三处电流、虚拟短路电流波形

Fig.10 Output voltage, current, frequency of inverter power supply, including current waveforms and virtual short-circuit current at three locations on the circuit

短路电流测量出逆变器电源和故障点间的距离,传统继电保护可根据该值动作于跳闸装置切除故障。

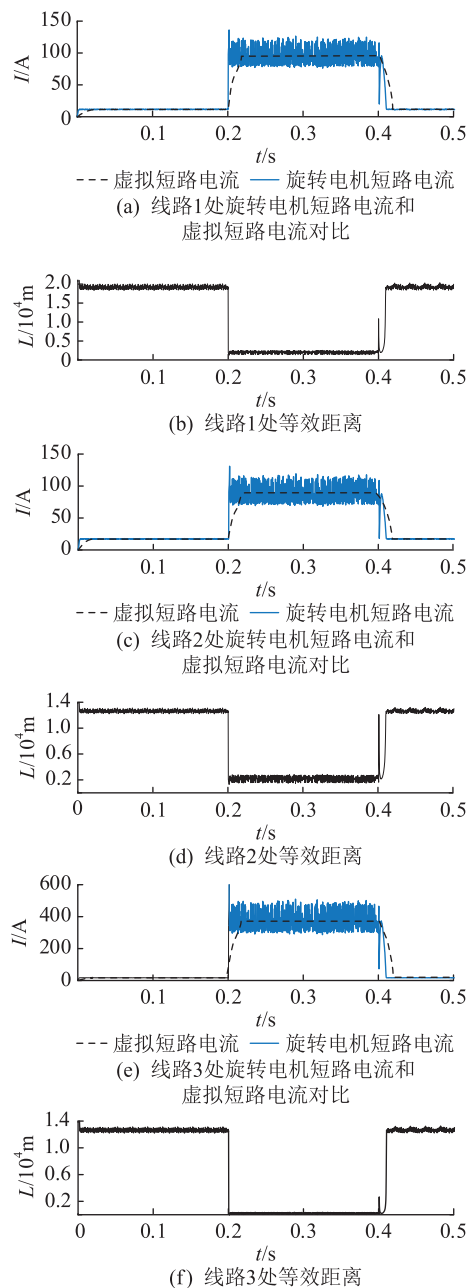


图 11 旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比及高等效距(单电源双回路供电线路)

Fig.11 Comparison of short circuit currents and virtual short circuit currents of rotating motor, and equivalent distance (single power supply dual-circuit power supply line)

### 3.3 两端供电

图 12 为在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建的两端供电的电路结构。

图 12(a) 和 (b) 除了供电的电源不同,回路的其余部分及故障的设置均相同。电路的设置:旋转电机在整个过程中的输出相电压始终保持为 220 V;逆变器电源在故障发生前和故障消除后,通过电压滞环控制保持输出相电压始终为 220 V,在故障期间,通过电流滞环控制保持输出电流幅值始终为

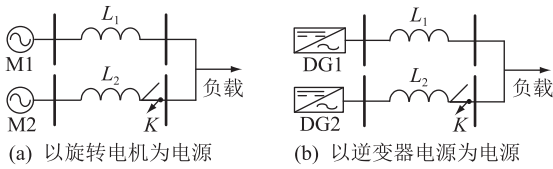


图 12 两端供电仿真模型示意

Fig.12 Schematic diagram of power supply simulation model at both ends

40 A;故障发生在 0.2 s,故障类型为三相短路故障,故障的切除发生在 0.4 s。

图 13 为 2 个旋转电机在整个过程的端口电压以及三处线路上的电流的变化情况。

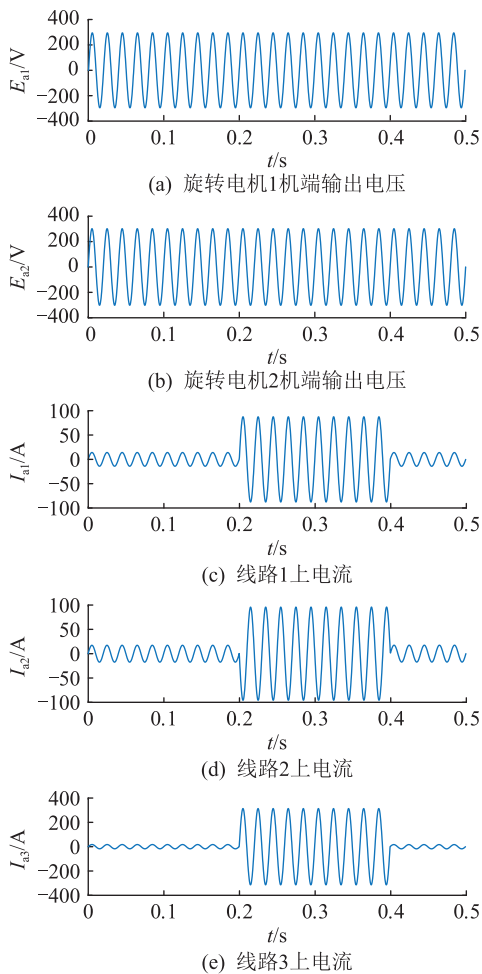


图 13 旋转电机机端输出电压和线路上三处电流波形

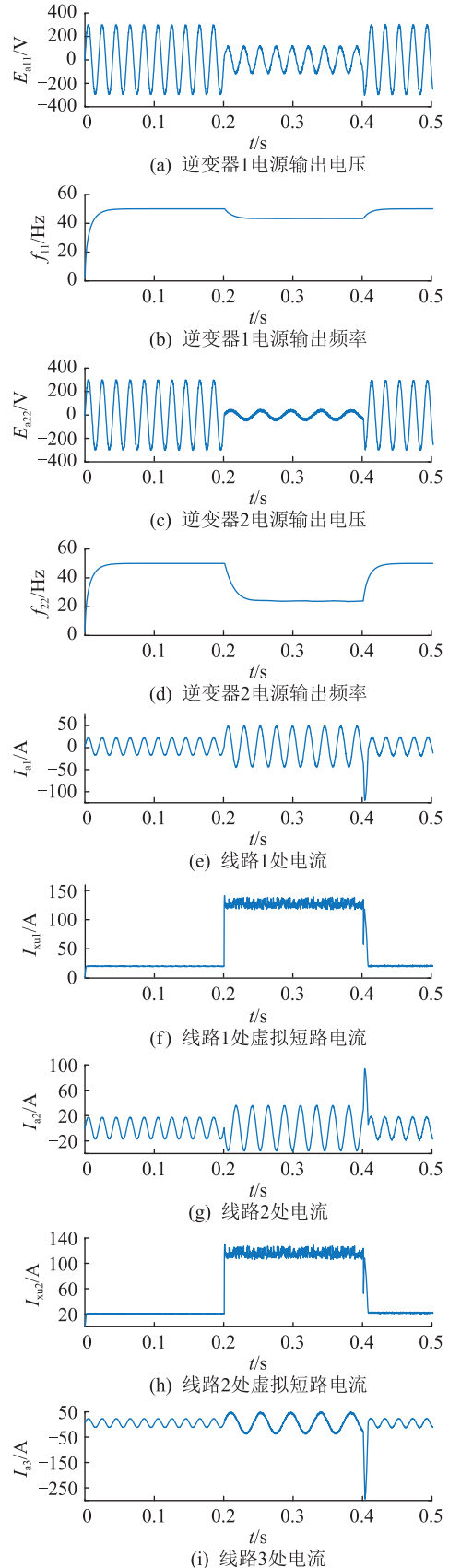
Fig.13 Output voltages of rotating motor terminal and current waveforms at three locations on the circuit

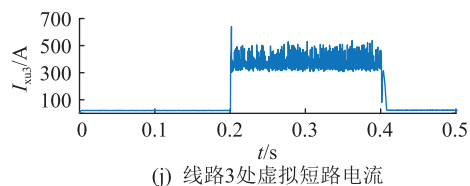
由图 13(a)和(b)可知,在故障前后,2 个旋转电机的输出相电压始终能够为 220 V。由图 13(c)一(e)可知,因 2 条回路的阻抗近似相等,故障前 1、2、3 处的电流值近似相等。在发生三相短路故障后,三处的故障电流幅值达 310 A 左右,故障切除后,各处的电流又恢复到故障前的值。

图 14 为 2 个逆变器电源在整个过程的端口电

压、频率以及线路上三处电流和对应的虚拟短路电流的变化情况。

根据图 14(a)一(d)可知,系统正常时,2 个逆变器电源在恒压控制的作用下,输出相电压保持为





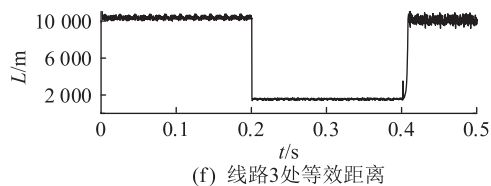
(j) 线路3处虚拟短路电流

图 14 逆变器电源输出电压、频率和线路上三处电流、虚拟短路电流波形

Fig.14 Output voltages, frequencies of inverter power supplies, including current waveforms and virtual short-circuit current at three locations on the circuit

220 V, 频率为工频(即 50 Hz);在故障期间,2 个逆变器电源在恒流控制的作用下,保持故障电流的幅值为 40 A 输出;在故障期间,逆变器电源 1 的频率保持在 44 Hz 左右,逆变器电源 2 的频率保持在 25 Hz 左右。由图 14(f)、(h)、(j)可知,经过解调模块得到的虚拟短路电流在故障期间幅值足够高。

图 15 为线路上三处旋转电机短路电流和解调得到的虚拟短路电流对比以及根据虚拟短路电流测得的逆变器电源和故障点间的等效距离。



(f) 线路3处等效距离

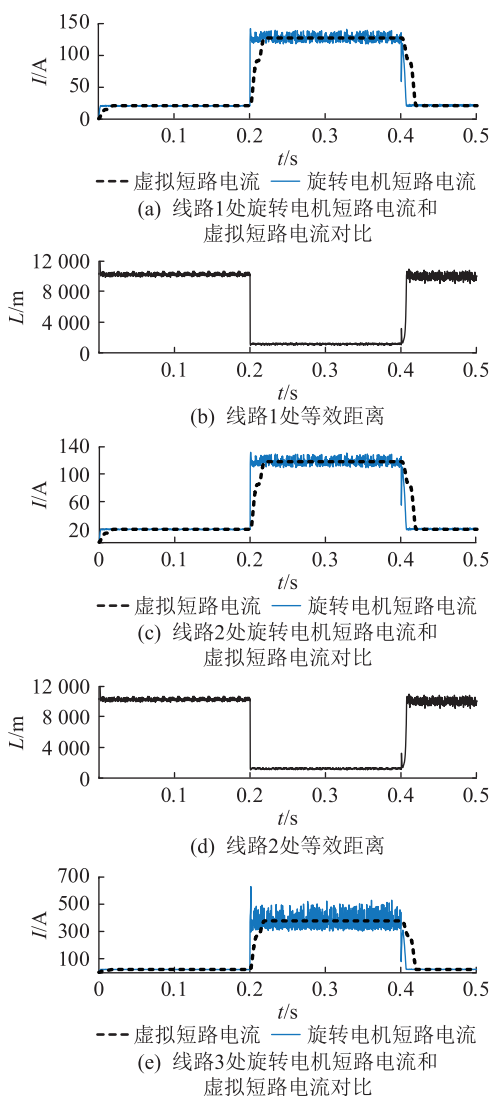
图 15 旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比及等效距离(两端供电线路)

Fig.15 Comparison of short circuit currents and virtual short circuit currents of rotating motor, and equivalent distance (power supply lines at both ends)

经过仿真分析可知:在整个过程中,得到的虚拟短路电流和旋转电机短路电流高度吻合,且根据虚拟短路电流测量出了逆变器电源和故障点间的距离,传统继电保护可以根据该值动作于跳闸装置切除故障。

### 3.4 单端双电源供电

在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建的单端双电源供电的电路结构如图 16 所示。



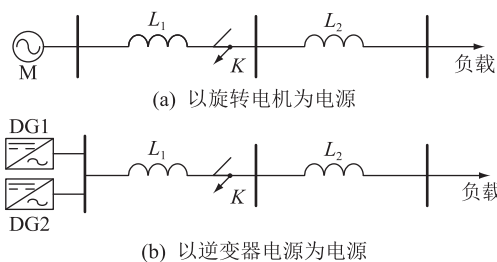
(a) 线路1处旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比

(b) 线路1处等效距离

(c) 线路2处旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比

(d) 线路2处等效距离

(e) 线路3处旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比



(a) 以旋转电机为电源

(b) 以逆变器电源为电源

图 16 单端双电源供电仿真模型示意

Fig.16 Schematic diagram of single terminal dual power supply simulation model

电路的设置:旋转电机在整个过程中的输出相电压始终保持为 220 V;逆变器电源在故障发生前和故障消除后,通过电压滞环控制保持输出相电压始终为 220 V,在故障期间,通过电流滞环控制保持输出电流幅值始终为 40 A;故障发生在 0.2 s,故障类型为三相短路故障,故障的切除发生在 0.4 s。

图 17 为旋转电机在整个过程的端口电压以及线路上的电流的变化情况。

由图 17(a)可知,在故障前后,旋转电机的输出相电压始终为 220 V。由图 17(b)可知,在故障发生前,线路中的电流为 31 A 左右,故障发生后,线路中的电流达到 151 A 左右,故障切除后,线路中的电流又恢复到故障前的值。

图 18 为 2 个逆变器电源在整个过程的端口电压、电流、频率以及线路上的电流和对应的虚拟短路电流的变化情况。

根据图 18(a)—(f)可知,系统正常时,2 个逆变器电源在恒压控制的作用下,输出相电压保持为



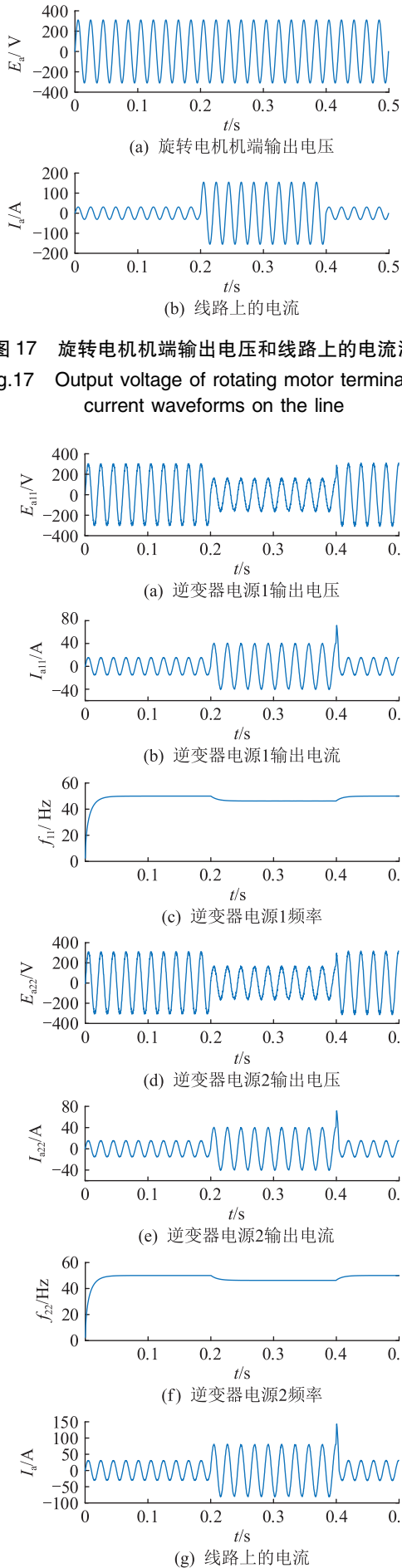


图 17 旋转电机机端输出电压和线路上的电流波形  
Fig.17 Output voltage of rotating motor terminal and current waveforms on the line

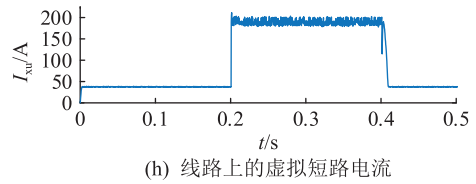


图 18 逆变器电源输出电压、电流、频率和线路上的电流、虚拟短路电流波形

Fig.18 Output voltages, currents, frequencies of inverter power supplies, waveforms of current and virtual short-circuit current on the line

220 V, 频率为工频(即 50 Hz);在故障期间,2 个逆变器电源在恒流控制的作用下,保持故障电流的幅值为 40 A 输出;在故障期间,2 个逆变器电源的频率都保持在 46 Hz 左右。由图 18(h)可知,经过解调模块得到的虚拟短路电流在故障期间幅值足够高。

图 19 为线路上的旋转电机短路电流和解调得到的虚拟短路电流对比以及根据虚拟短路电流测得的逆变器电源和故障点间的等效距离。

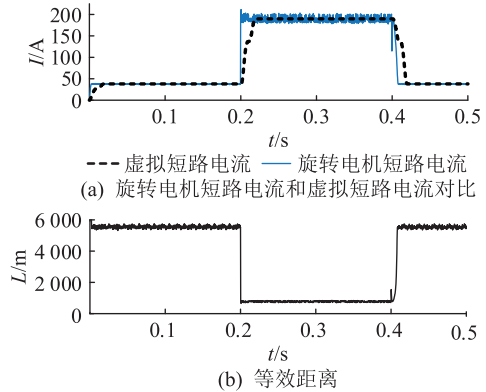


图 19 旋转电机短路电流和虚拟短路电流对比及等效距离(单端双电源供电线路)

Fig.19 Comparison of short circuit current and virtual short circuit current of rotating motor, and equivalent distance (single-ended dual power supply line)

经过仿真分析可知:在整个过程中,得到的虚拟短路电流和旋转电机短路电流高度吻合,因此可以根据该虚拟短路电流,参照传统的过电流三段式保护进行继电保护,同时根据该值可以计算出虚拟短路电压,进行传统的低电压保护。且根据虚拟短路电流测量出了逆变器电源和故障点间的距离,传统继电保护可根据该值动作于跳闸装置切除故障。

#### 4 结语

文中提出基于逆变器等效距离的微电网线路保护方法,即在逆变器电源故障后将故障信息量调制到电流中,进而获得明显的故障信息量,并测量

出了逆变器电源和故障点间的距离。为了验证该方法的正确性和可行性,进一步在仿真平台PSCAD/EMTDC下搭建了仿真模型进行验证。综上所述,结合仿真结果表明,文中所提的方法具备可行性与实用性。

### 致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“源网储融合型屋顶光伏能量交换关键技术研究”(J2022042)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 郑志宇,艾芊. 分布式发电概论[M]. 北京:中国电力出版社,2012.  
ZHENG Zhiyu, AI Qian. Introduction to distributed generation [M]. Beijing:China Electric Power Press,2012.

[2] 赵倩雯. 基于微电网接地故障的继电保护策略研究[J]. 电气技术与经济,2023(2):31-35.  
ZHAO Qianwen. Research on relay protection strategy based on micro-grid grounding fault[J]. Electrical Equipment and Economy,2023(2):31-35.

[3] 詹俊男,白迪. 微电网运行方式研究[J]. 电子世界,2019(23):25,28.  
ZHAN Junnan, BAI Di. Research on operation mode of micro-grid[J]. Electronics World,2019(23):25,28.

[4] 岳应娟,凤林,蔡艳平,等. 交直流混合微电网运行控制技术[J]. 科学技术与工程,2022,22(28):12242-12252.  
YUE Yingjuan, FENG Lin, CAI Yanping, et al. AC-DC hybrid microgrid operation control technology[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(28):12242-12252.

[5] 邢毓华,侯静茹,支娜. 功率互济的多独立微电网运行优化及分析[J]. 电工电能新技术,2022,41(3):33-42.  
XING Yuhua, HOU Jingru, ZHI Na. Operation optimization and analysis of independent double microgrid group with power mutual assistance[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2022,41(3):33-42.

[6] 周凌志,任永峰,陈麒同,等. 新型主从控制微电网运行控制策略研究[J]. 可再生能源,2021,39(8):1100-1106.  
ZHOU Lingzhi, REN Yongfeng, CHEN Qitong, et al. Operation control strategy of new master-slave control for microgrid[J]. Renewable Energy Resources,2021,39(8):1100-1106.

[7] 付林,孟宪珍,廖孟柯,等. 微电网运行控制与保护技术[J]. 轻工科技,2021,37(4):57-58.  
FU Lin, MENG Xianzhen, LIAO Mengke, et al. Microgrid operation control and protection technology[J]. Light Industry Science and Technology,2021,37(4):57-58.

[8] 刘旭峰. 主动配电网中微电网技术应用[J]. 电子世界,2020(9):181-182.  
LIU Xufeng. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electronics World,2020(9):181-182.

[9] 高海龙. 计及过渡电阻影响的接地距离保护方法研究[J]. 电气应用,2023,42(3):47-51.

GAO Hailong. Research on distance protection method considering the influence of grounding transition resistance[J]. Electro-technical Application,2023,42(3):47-51.

[10] 金甚达,范春菊,郭雅蓉,等. 考虑分布式逆变电源特性的距离Ⅱ段自适应保护整定方案[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(23):41-50.  
JIN Shenda, FAN Chunju, GUO Yarong, et al. Adaptive distance section II protection setting scheme considering the characteristics of an inverter-interfaced distributed generator[J]. Power System Protection and Control,2022,50(23):41-50.

[11] 李东. 过渡电阻对双侧电源供电系统保护的影响[J]. 机电信息,2022(19):23-25,29.  
LI Dong. Influence of transition resistance on protection of bilateral power supply system[J]. Mechanical and Electrical Information,2022(19):23-25,29.

[12] PRISCILA C N, MICHEL G O, VIEIRA J C M. Investigation on using low voltage automatic regulation to minimize the impacts of charging plug-in electric vehicles in distribution systems[J]. Renewable Energy and Power Quality Journal,2021,19:85-90.

[13] 崔岩,许想奎,李杨春. 带串联补偿装置的输电线路距离保护新方案[J]. 能源与环保,2022,44(10):222-228.  
CUI Yan, XU Xiangkui, LI Yangchun. A new distance protection scheme for transmission lines with series compensation equipment[J]. China Energy and Environmental Protection,2022,44(10):222-228.

[14] 张建华,黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.  
ZHANG Jianhua, HUANG Wei. Operation control and protection technology of microgrid[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010.

[15] 刘向宁,王忠博,牛威. 分布式电源逆变器的功率控制[J]. 电子技术与软件工程,2022(16):71-74.  
LIU Xiangning, WANG Zhongbo, NIU Wei. Power control of distributed power inverters[J]. Power & Electronical Technology,2022(16):71-74.

[16] 苏萌. 分布式发电技术在电力系统中的应用综述[J]. 价值工程,2019,38(27):227-228.  
SU Meng. Summary of application of distributed power generation technology in power system[J]. Value Engineering,2019,38(27):227-228.

[17] LENKA R K, PANDA A K. Grid power quality improvement using a vehicle-to-grid enabled bidirectional off-board electric vehicle battery charger[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications,2021,49(8):2612-2629.

[18] 洪智勇,林青瑜. 含高比例分布式电源接入的配电网承载能力综合评估方法[J]. 大电机技术,2023(4):77-82.  
HONG Zhiyong, LIN Qingyu. A comprehensive evaluation method for carrying capacity of distribution networks with high proportion access of distributed power[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2023(4):77-82.

[19] 纪静,梁毅. 电力系统振荡对距离保护影响的仿真分析

- [J]. 电子制作,2022,30(17):98-100,97.  
JI Jing,LIANG Yi. Simulation analysis of the influence of power system oscillation on distance protection[J]. Practical Electronics,2022,30(17):98-100,97.
- [20] 赵施阳,张忠傲,于新民,等. 微电网继电保护的研究与应用[J]. 山东工业技术,2019(9):210.  
ZHAO Shiyang,ZHANG Zhongao,YU Xinmin,et al. Research and application of micro-grid relay protection[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2019(9):210.
- [21] LIM K,KIM J J,LEE J. Forecasting the future scale of vehicle to grid technology for electric vehicles and its economic value as future electric energy source;the case of South Korea[J]. Energy & Environment,2020,31(8):1350-1366.
- [22] 刘宇,张明. 分布式电源并网条件下的配电网继电保护策略[J]. 光源与照明,2022(10):228-230.  
LIU Yu,ZHANG Ming. Relay protection strategy of distribution network under the condition of distributed power grid connection[J]. Lamps & Lighting,2022(10):228-230.
- [23] 李彪,菅永,曹雪源,等. 基于主从控制的微电网电压质量改善策略[J]. 电力工程技术,2020,39(6):117-123.  
LI Biao,JIAN Yong,CAO Xueyuan,et al. Strategy for improving voltage quality of microgrid based on master-slave control[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(6):117-123.
- [24] 孙攀,温富光,李培宜,等. 低压微电网保护技术研究[J]. 电工技术,2019(22):153-155.  
SUN Pan,WEN Fuguang,LI Peiyi,et al. Research on protection technology for low voltage microgrid[J]. Electric Engineering,2019(22):153-155.
- [25] 易洋,骆雅姿,张子瑜,等. 集中式光伏电站汇集系统故障分析与保护方案[J]. 电力工程技术,2021,40(2):1-10.  
YI Yang,LUO Yazhi,ZHANG Ziyu,et al. Failure analysis and protection scheme of centralized photovoltaic power station convergence system[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(2):1-10.
- [26] 张琳,吕翔,刘旸. 集中式光伏电站发电效率提升策略分析[J]. 电站系统工程,2022,38(1):71-72.  
ZHANG Lin,LYU Xiang,LIU Yang. Analysis on enhancing generation efficiency for centralized photovoltaic power plant[J]. Power System Engineering,2022,38(1):71-72.

---

作者简介:



周前

周前(1978),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统分析工作(E-mail:xjtu@163.com);

朱丹丹(1991),女,博士,工程师,从事电力系统分析工作;

汪成根(1981),男,博士,高级工程师,从事电力系统分析工作。

## Fault protection method of source-grid-storage microgrid based on equivalent distance criteria

ZHOU Qian, ZHU Dandan, WANG Chenggen

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** With the continuously challenges of energy and environmental, the development of distributed power generation technologies focused on renewable energy is rapidly advancing. Microgrid based on inverter power source is the important form of distributed generation, but it is difficult to isolate faults selectively and accurately when short circuit fault occurs in grid, and will result in overall shutdown. Aimed at the characteristics of inverter power sources and microgrid structures, a protection method based on equivalent distance for lines of source-grid-storage microgrid is proposed. Realtime information of the fault line is modulated into the terminal frequency by modulation techniques. Subsequently, virtual short-circuit currents are obtained via demodulation techniques, and fault distances are measured through equivalent internal potential. It is verified by theoretical analysis and simulation experiments in four typical cases, such as single power source circuits, and this method can effectively calculate virtual short-circuit currents. These currents are equivalent to the virtual currents output when traditional rotating motors act as power sources. The proposed method can use the aforementioned virtual short-circuit current to determine the distance between the inverter power source and the fault point.

**Keywords:** new power system; relay protection; microgrid; inverter; equivalent distance; virtual current

(编辑 钱悦)