

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007040

一种海上平台直流微网系统复合型短路故障检测方法*

李振宇^{1,2}, 王国玲^{1,2}, 杨宇生¹, 杨荣峰^{1,2}, 许顺孝^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室 厦门 361021)

摘要:针对海上平台直流微网系统可靠性要求高、容量小、线路阻抗值小、短路故障电流上升率高、短路故障检测速度快的要求,基于方向电流法对母线短路故障检测选择性差、差分电流法覆盖范围有限的固有问题,提出电流差动法与方向电流法相结合的复合型短路故障检测方法。根据电流基本定律、各支路故障电流方向特性及变化量大小检测母线和支路发生的短路故障,并给出具体实现方法,搭建了缩小比例的实验平台,通过控制 IGBT 导通设置短路故障,完成了母线和支路短路故障实验。实验结果表明,母线短路故障切除时间为 0.09 ms,支路短路故障切除时间为 0.22 ms,检测速度优于目前直流环形微网系统短路故障检测速度,且选择性好、覆盖范围大。

关键词: 电流检测; 短路故障; 微网; 直流; 海上平台

中图分类号: TM773 TH701 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

A combined short-circuit fault detection method for DC microgrid system in an offshore platform

Li Zhenyu^{1,2}, Wang Guoling^{1,2}, Yang Yusheng¹, Yang Rongfeng^{1,2}, Xu Shunxiao^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: The offshore DC microgrid system has requirements of high reliability, low power capacity, low line impedance, and high fault-current rising rate for its detection. To address these issues, a kind of combined short-circuit-fault detection method is proposed, which consists of the differential current method and the directional current method. Short-circuit fault of bus and branch is detected by using the basic law of current, current direction characteristics and variation magnitude of each branch fault. The specific implementation method is given. A scaled-down experiment platform is established. By setting short-circuit fault through controlling IGBT (insulated gate bipolar transistor), experiments on short-circuit fault of bus and branch are implemented. Experimental results show that the removal time of bus short-circuit fault is 0.09 ms, and the removal time of branch short-circuit fault is 0.22 ms. The detection speed is faster than that of the current DC ring micro-grid system short-circuit fault, and it also has good selectivity and wide coverage.

Keywords: current detection; short circuit fault; microgrid; DC; offshore platform

0 引言

随着我国海洋经济的深入发展,海洋观测仪器、海洋勘测、海上发电装置^[1]、海工钻井等各种海上平台已成为开发与利用海洋资源、获取海洋信息的重要途径^[2-4],远海平台远离大陆,恶劣且潮湿的海上环境,极易导致短路

故障的频发,而海上平台面积的限制使得其相对陆地电网而言,线路阻抗更小、短路故障电流上升速率更快,且远海平台对供电系统可靠性要求更高,以保证探测仪器的正常运行。因此,海上平台直流微网短路故障的快速检测与准确隔离非常重要。

直流母线短路故障保护方法一般可分为过电流保护、电流斜率保护、差动保护等时域故障检测方法。其

收稿日期:2020-10-25 Received Date: 2020-10-25

* 基金项目:国家自然科学基金(51809114)、福建省自然科学基金(2019J01702)、福建省教育厅计划资助项目(JT180268)、集美大学国家基金培育项目(ZP2020006)资助

中,过电流保护是直流电力系统常用的一种保护方式^[5-6],其通过所设置的阈值和延时实现,当母线电流超过限定值时,过流保护装置动作,海洋平台直流微网系统中具有多个单元,过流保护难以实现保护的选择性;电流斜率保护基于微分计算,即通过检测故障电流的斜率来判断短路故障^[7-8],其触发保护在故障初期检测到故障特征信息后即可动作,无需电流上升到极大值,故具有检测灵敏、速度快的特点,但检测精度易受采样误差以及电流动态响应影响,系统可靠性不佳;电流差动保护是通过实时检测流入与流出保护区域的电流差值来判别,精度高、选择性强^[9-10],但对故障检测设备之间的同步要求较高,对保护区外的支路短路故障选择性差;方向电流法则利用支路流向母线电流的方向、大小检测故障^[11-12],各检测单元之间在无需通信情况下,即可准确检测和定位故障位置,速度快、精度高且检测设备简单。除以上时域故障检测方法外,还有利用短时傅里叶变换、小波变换和S变换等频域故障检测方法,即将时域信号转变为频域信号后进行数据分析,算法计算量相对较大,检测时间相对较长^[13-15]。

目前,直流微网短路故障检测的很多方法尚处于理论阶段,差分电流和方向电流这两种方法在兼顾可靠性、实用性、选择性和速度方面较佳^[10-11]。差分电流法因其成本高,适用于直流微网母线短路故障检测与保护,对于保护区外的支路短路故障检测选择性差;而对支路短路故障的快速检测与保护可采用方向电流法,具有可靠性高、简单有效特点,然而当直流母线发生短路故障时,该检测方法需切断所有母线连接,包括非故障线路,就会导致海上平台供电系统中断,一些重要设备和仪器无法正常工作。

本文基于海洋平台对直流微网短路故障的快速检测与故障点隔离、非故障电路正常运行的高可靠性要求,结合海上平台面积有限、线路阻抗小的特点,深入研究了海上平台直流微网系统母线和支路短路故障机理,提出了复合型短路故障检测方法及其具体实现方法,利用母线两端的电流大小、支路与母线节点处两侧的电流量和阈值大小检测母线和支路短路故障,实现母线和支路短路故障快速定位和准确隔离。

1 海上平台微网系统拓扑结构

海上平台直流微网系统可由风、光、海流等海洋新能源发电单元、平台交直流负荷和储能装置等单元构成。本文所研究的海上平台环形直流微网系统如图1所示,各单元从第1个单元接入直流母线,顺时针方向,母线侧共顺次连接 z 个单元,而 m 、 n 为其中的两个相邻单元。各单元可以是新能源发电单元、储能单元或负荷单元,通

过功率变换器接在环形网络上;环形母线结构决定了各新能源发电单元与负荷单元均有两条供电线路。

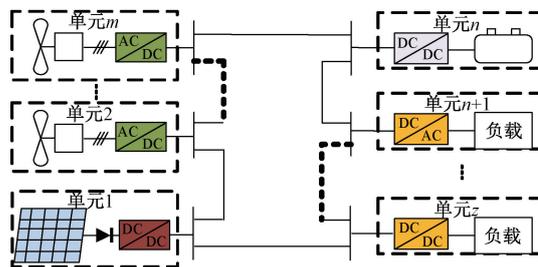


图1 海上平台环形直流微网系统

Fig. 1 DC microgrid system of the offshore platform

2 海上平台微网系统短路故障分析

2.1 母线短路故障分析

与陆地分布式直流微网系统相比,海上平台直流微网系统未与大电网相连,且工作环境恶劣、无人值守,故对系统运行的可靠性要求更高;同时,受限於海上平台的面积,海上平台直流微网系统的容量有限、且线路较短,一般直流微网系统短路故障的检测方法不能直接适用于海上平台直流微网系统。海上平台直流微网系统本质上是一个多能源直流供电系统,系统母线和单元直流侧上任意一点发生短路故障时,各单元电压、电流故障差异性小,故对研究短路故障检测问题,需先对短路故障特性做以分析。

海上平台直流微网系统各新能源单元及储能单元发生短路故障时,其功率变换器将自动闭锁,故各单元故障等效电路相同,短路故障电流即为功率变换器输出侧电容放电电流。以单元 n 为例,其故障等效电路如图2所示,其中 C_n 为功率变换器直流输出侧滤波电容, R_{eqn} 、 L_{eqn} 为功率变换器与短路故障点之间的等效线路电阻、电感。

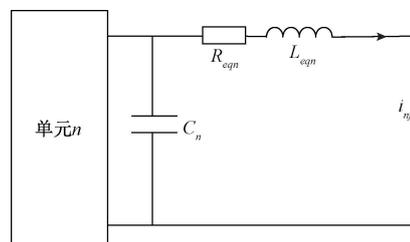


图2 单元 n 到母线故障点的等效电路

Fig. 2 Fault equivalent circuit of unit n to the bus fault point

由图2可知,当系统发生母线故障,故障电流主要为滤波电容放电电流。根据 RLC 二阶电路自然响特性,电容电压 v_{cn} 和故障电流 i_{df} 的时域表达式(1)所示。

$$\begin{cases} v_{cn} = \frac{V_0 \omega_0}{\omega} e^{-\varphi t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C_n} e^{-\varphi t} \sin \omega t \\ i_{nf} = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\varphi t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{V_0}{\omega L_{eqn}} e^{-\varphi t} \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_{eqn} < \sqrt{L_{eqn}/C_n}$; V_0, I_0 为电压、电流初始值; $\varphi = R_{eqn}/2L_{eqn}$; $\omega_0 = \sqrt{\varphi^2 + \omega^2} = 1/\sqrt{L_{eqn}C}$; $\beta = \arctan(\omega/\varphi)$, 其相应的波形如图 3 所示。

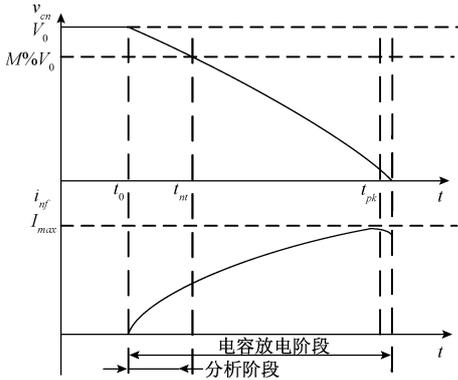


图 3 故障电容电压和故障电流特性

Fig. 3 Characteristics of fault capacitance voltage and current

由图 3 可知,系统在 t_0 时刻发生短路故障后,故障电流 i_{nf} 以高斜率快速增加、直流母线电压 v_{cn} 快速下降,直至 t_{pk} 时刻, i_{nf} 增至峰值电流 I_{max} , v_{cn} 降至趋近于 0。设 $M\%$ 为电网实时电压与初始电压的比值,直流配电系统中,电压波动范围一般取 $\pm 10\%$ [16], 所以 $M \geq 90$ 。实际中,如果系统电压变化范围超出 $\pm 10\%$,但能在较短时间(一般 100 ms 以下)内恢复正常,常用工业设备也能正常工作 [17]。

海上平台直流微网系统正常工作时,流进某段母线一端的电流等于流出该母线另一端的电流,当该段母线发生短路故障时,由叠加原理可知,在母线上的故障点就会有 z 个单元产生的故障电流之和流出母线,导致该段母线两端的电流之差不为零,故差分电流法适用于对母线的故障检测,而对保护区外的系统单元直流侧发生的短路故障,差分电流法无法准确定位发生短路故障的支路 [18]。

2.2 支路短路故障分析

由于直流侧并接电容较大,短时间的支路短路故障不会造成母线电压的大幅波动,且根据实际海上平台电力系统可靠性要求,发生短路故障的支路必须快速检测并隔离,故可将系统各单元的输出侧等效为恒压源。微网系统支路直流侧发生短路故障时,从母线端口来看,各单元等效电路均相同。以单元 n 为例,其故障等效电路模型如图 4 所示,其中电流以单元流向母线方向为参考正方向,根据图 4 支路故障等效电路模型,可以得到如式(2)微分方程,根据假设的支路电流正方向,通过解

式(2)微分方程,可以求得支路短路故障时,每个单元的故障电流大小及方向。

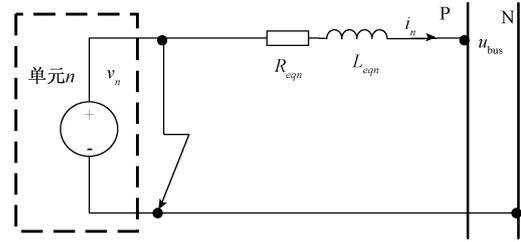


图 4 单元 n 直流侧短路故障的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of unit n for DC side short circuit fault

$$\begin{cases} R_{eq1} i_1 + Leq_1 \frac{di_1}{dt} + u_{bus} = v_1 \\ R_{eq2} i_2 + Leq_2 \frac{di_2}{dt} + u_{bus} = v_2 \\ \vdots \\ i_1 + i_2 + \dots + i_n + \dots + i_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当海上平台直流微网系统新能源发电单元和储能单元初始电流为正、负荷单元初始电流为负时,由式(2)即可判断得知,某单元直流侧短路后,其他单元故障电流方向和变化率始终为正,故障单元故障电流方向和变化率始终为负。系统其他工况下对应的不同初值电流,故障单元输出直流侧短路前后电流方向变化情况同样可通过式(2)判断得到。因此,基于电流方向法可准确检测单元直流侧短路故障点,但对母线短路故障检测缺乏选择性。

为了克服差分电流法和电流方向独立使用时无法对故障点进行准确定位,本文综合了这两种检测方法的优点,提出一种复合型短路故障检测方法,以期实现对系统母线及单元直流侧短路故障点的快速检测与准确定位,从而实现了对故障线路的快速隔离,保证非故障线路正常运行。

3 复合型短路故障检测方法

3.1 复合型短路故障检测方法的原理

海上平台直流微网系统母线短路故障如图 5 所示,其中 F_b 为母线短路故障点,处在单元 m 与单元 n 之间。设流向单元 m 和单元 n 之间母线的电流分别为 I_{m2} 和 I_{n1} , 电流增量为两路电流增量 ΔI_{m2} 和 ΔI_{n1} , 则依据式(3)进行动作判据。

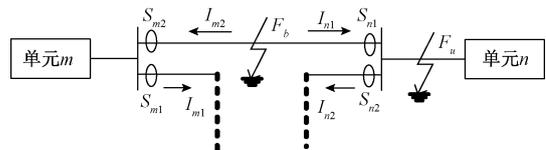


图 5 系统母线故障原理

Fig. 5 Principle of system bus fault

$$\begin{cases} I_d = |I_{m2} + I_{n1}| \\ I_r = |I_{m2} - I_{n1}| \\ I_d > k * I_r \\ I_d > I_q \end{cases} \quad (3)$$

式中： I_d 和 I_r 分别为差动电流和制动电流； $k(0 < k < 1)$ 为制动系数； I_q 为差动保护的启动值，可根据实际器件和线路承受的电流情况选取。

当检测系统短路故障 F_u 时，则借助单元 n 连接母线节点处的电流传感器 S_{n1} 和 S_{n2} 实时采集电流进行处理，基于方向电流法处理这两路电流的大小和方向变化情况。与单独使用差分电流法检测母线故障相比，并没有增加检测设备。单元 n 发生短路故障时，正常单元的电流流向故障单元 n ，电流方向没有发生变化，而故障单元的电流方向则有正转变为负，通过式(4)的动作判据进行判别。

$$\begin{cases} \Delta I_{n1} = I_{n1i} - I_{n1(i-1)} \\ \Delta I_{n2} = I_{n2i} - I_{n2(i-1)} \\ \Delta I_{n1} < 0 \\ \Delta I_{n2} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： ΔI_{n1} 和 ΔI_{n2} 是单元 n 直流侧流向母线的电流增量； I_{n1i} 和 I_{n2i} 是采样当前时刻的值； $I_{n1(i-1)}$ 和 $I_{n2(i-1)}$ 是当前采样时刻的前一个时刻的电流值。为了减少固态断路器的误动作，在满足式(4)的动作判据情况下，还必须满足流向该单元的故障电流大于动作阈值 I_{th} ， I_{th} 按式(5)进行计算。

$$I_{th} = \min \{ n \cdot I_{nt}, I_{cmax}, I_{gmax} \} - k_{max} t_d \quad (5)$$

式中： I_{nt} 是故障单元 n ，是当母线电压下降到 $M\%$ 初始电压值对应的电流； I_{cmax} 是单元 n 直流侧电容所能承受的最大电流； I_{gmax} 是断路器所能承受的最大电流； k_{max} 为故障电流斜率的最大值； t_d 为断路器保护的延时时间。 I_{nt} 按式(6)计算。

$$\begin{cases} M\% V_0 = \frac{V_0 \omega_0}{\omega} e^{-\varphi t_{nt}} \sin(\omega t_{nt} + \beta) - \frac{I_0}{\omega C_n} e^{-\varphi t_{nt}} \sin \omega t_{nt} \\ I_{nt} = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\varphi t_{nt}} \sin(\omega t_{nt} - \beta) + \frac{V_0}{\omega L_{eqn}} e^{-\varphi t_{nt}} \sin \omega t_{nt} \end{cases} \quad (6)$$

因此，当单元 n 发生短路故障时，其动作判据如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta I_{n1} < 0 \\ \Delta I_{n2} < 0 \\ |I_n| > |I_{th}| \end{cases} \quad (7)$$

式中： I_n 是流向单元 n 故障电流。

3.2 复合型短路故障检测方法的实现

设单元 m 和单元 n 之间的母线、单元 n 直流侧短路

故障时，故障检测方法具体实现如图6所示，系统其它母线和单元直流侧发生的短路故障检测实现方法与此相同。

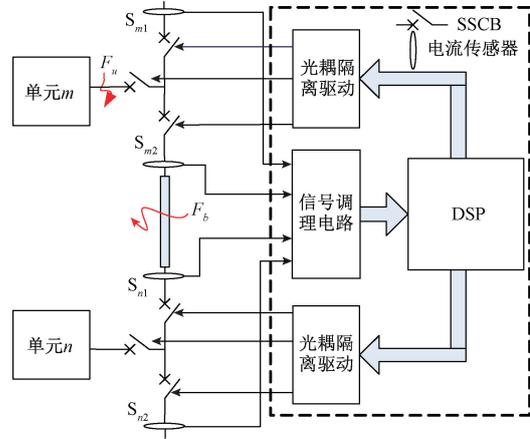


图6 复合型短路故障检测方法实现原理

Fig. 6 Realization principle of the combined short-circuit-fault detection method

系统故障检测方法的检测准则为先判别母线故障段，再进一步判断是支路故障还是母线本身故障，以准确定位到故障点，并切换相关母线段及设备，其具体实现流程如图7所示。

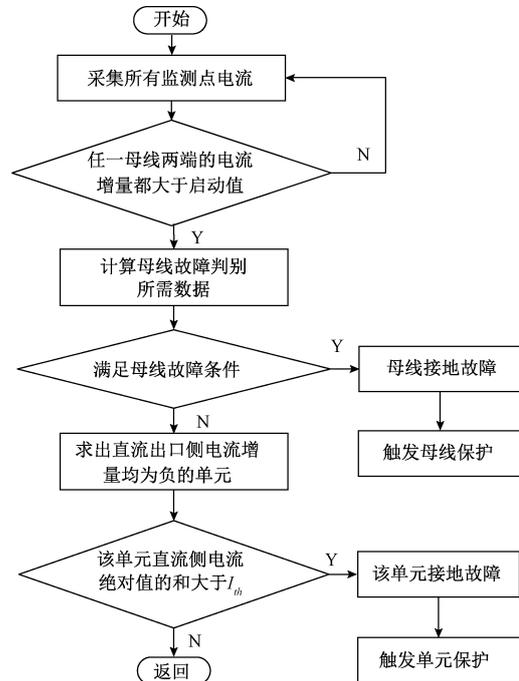


图7 复合型短路故障检测方法实现流程

Fig. 7 Flow of the combined short-circuit-fault detection method

由图7可知，保护系统实时采集关键点电流值并进行短路保护的启动判别，若满足判别条件，则系统开始进

入短路保护。相比于支路短路故障,母线短路故障极易导致直流微网系统的全面崩溃,影响相对较严重,故首先需依次判别各段母线是否发生故障。若母线发生故障,则控制与其相连接的固态断路器隔离该母线,而非故障线路通过环形的另一条供电线路正常工作;若母线未有故障发生,则进而判别各单元是否发生故障,以隔离故障单元。

4 海洋平台直流微网短路故障实验

4.1 实验平台的搭建

本文实验平台的搭建基于课题组所设计的漂浮式海上雷达测风移动平台风光储直流微网系统^[19],包括风光储发电系统、测量设备、监控设备及电力系统通风排水设备 4 部分,海洋平台相关参数如表 1 所示,其中母线电缆材料为铜。

表 1 海洋平台相关参数

Table 1 Parameters of the offshore platform

母线	参数	类型	参数
母线电压	350 V	平台尺寸	12 m×8 m
电缆截面积	25 mm ²	太阳能总功率	5 kW
线电阻	0.7 Ω/km	风机总功率	8 kW
线电感	1.84 mH/km	蓄电池容量	96 V, 2 kAH
母线长度	40 m	平台负荷	11 kW

根据上述系统参数,按照 10:1 的近似比例构建实验平台,如图 8 所示。其中单元 1 与单元 2 为直流稳压电源,用以模拟实际平台上太阳能发电单元和储能单元,单元 3 为阻性负载,用以模拟平台负载,3 个单元通过环形线路连接在一起。

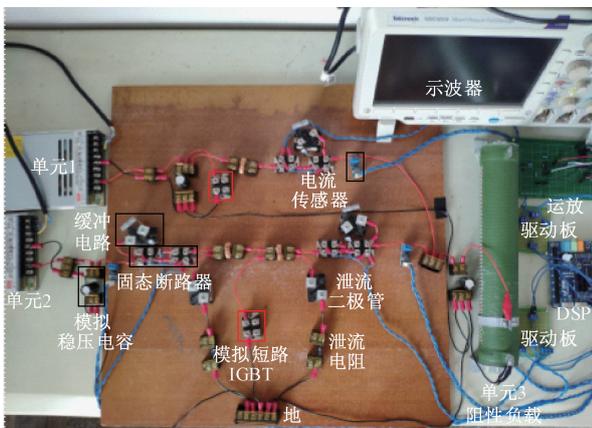


图 8 实验平台硬件结构

Fig. 8 Hardware structure diagram of the experiment platform

单元 1 与单元 2 采用 24 V 直流电源,单元 3 采用 13.8 Ω 电阻负载,则理论上每路直流源输出电流为 0.87 A,负载电流为 1.74 A。在两路直流源和负载两端并联有 2 200 μF 电容,模拟稳压电容,线路中串入 10 μH 电感,模拟线路电感;用两个带二极管的绝缘栅双极型晶体管 IGBT 模块反串联构成一个双向固态断路器,且在每个 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 管上并联 RCD 缓冲电路,其由整流二极管,10 Ω 的缓冲电阻和 10 μF 的缓冲电容组成,以保护断路器免遭大电压电流冲击;单只 IGBT 用于短路故障模拟开关;泄流支路用 4 Ω 泄流电阻和整流二极管构成;检测系统采用 TMS320F28335 DSP (digital signal processor) 控制器实现。

4.2 母线短路实验结果与分析

将单元 2 和单元 3 之间连接进行短路,以模拟母线短路故障,单元 2 输出电流波形如图 9 所示。母线短路瞬间,单元 2 输出电流快速上升,故障持续约 0.09 ms 时,母线被切断,实现了对故障段的隔离,此时故障电流快速减小,经 0.4 ms 后,故障电流趋近于 0。

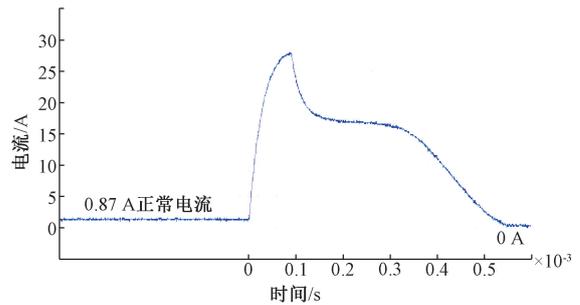


图 9 直流母线短路时单元 2 输出电流波形

Fig. 9 The output current waveform of unit 2 in DC bus short-circuit fault

故障发生后,负载侧电流、电压的变化情况如图 10 所示。有保护的情况下,故障发生后负载侧电流快速反向增加,电压也迅速下降,大约在 0.09 ms 后,固态断路器动作,泄流支路消耗故障电流,随后慢慢趋近于零,故障电流被清除,电压迅速恢复。短路故障发生后,电压瞬时下降后, M 的值小于 90,即电网电压波动超过 ±10%,但是超出正常范围的持续时间远小于工业设备正常工作所需的时间,一般为 100 ms 以下^[17],可以满足海上平台直流微网检测要求。由于电感的存在,在电压恢复时会有个电压突起。由于一般设备都有较大的过压保护,因此,这个瞬时突起不会对设备造成危害。

4.3 支路短路实验结果与分析

系统 DSP 控制器输出控制信号给模拟短路故障开关的 IGBT 驱动电路,将短路开关接通,致使单元 1 输出

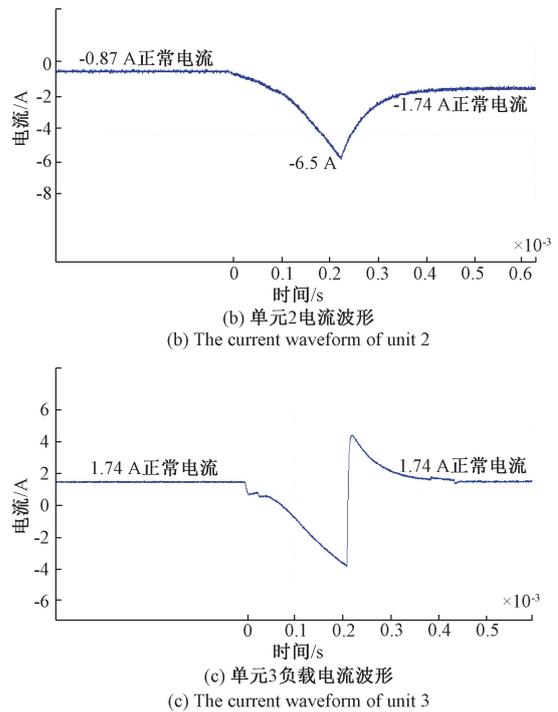
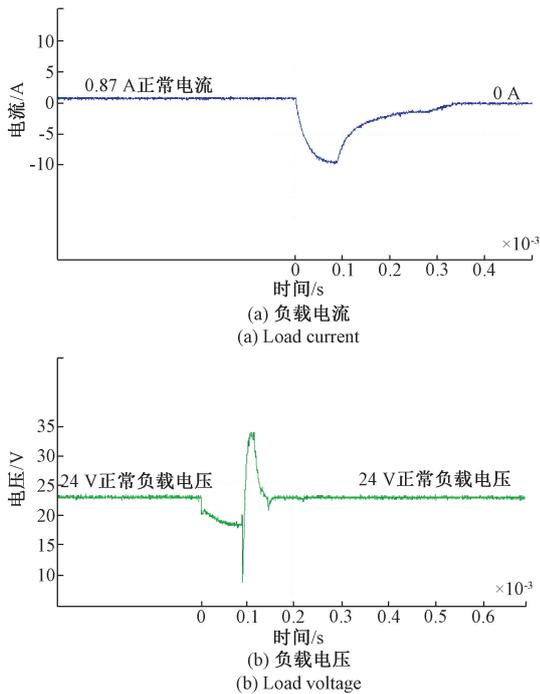


图 10 故障后负载电压与电流波形

Fig. 10 The load current and voltage waveform in DC bus short

侧短路,用以模拟支路短路故障,实验波形如图 11 所示。当故障发生后,单元 2 输出侧与单元 1 短路故障点之间构成短路,故障电流迅速负向增加;单元 3 因其支路并联的稳压电容放电,故其故障电流为负;由于单元 2 与 3 的支路电流均流入单元 1 故障点,故单元 1 故障电流迅速正向增加。故障持续约 0.22 ms 时,连接在单元 1 支路上的固态断路器动作,切断其与母线的连接,其故障电流迅速降为 0,实现对故障单元 1 的隔离;单元 1 隔离后,单元 2 单独向单元 3 供电,故单元 3 恢复正常负载电流。由图 11(d) 可知,在支路故障过程中,负载电压降至 22.8 V 后迅速恢复正常,其失压未超过额定电压 10%,即 $M% > 90%$,进一步说明了本文所提出方法的快速性。

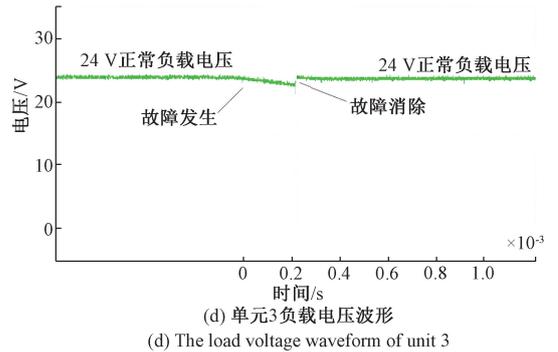
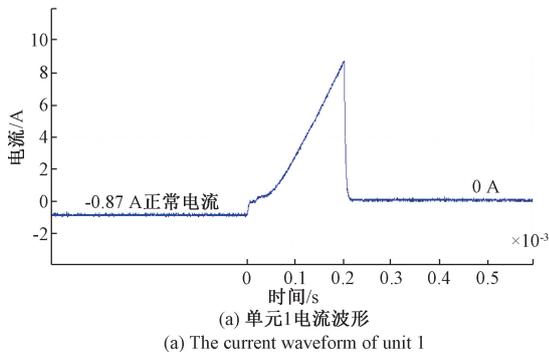


图 11 单元 1 发生支路短路故障时实验波形

Fig. 11 The test waveforms of unit 1 in branch short-circuit fault

4.4 故障检测时间对比

本文所提出的复合检测方法与 4 篇已发表的检测方法相关文献所需检测时间如表 2 所示,其均在环型直流微网系统上进行实验获取。其中,文献[20]采用电流估计等效电感的方法实现;文献[21]基于故障电流大小、方向和故障电压检测母线和支路短路故障;文献[22]利用最小二乘法估计故障线路电感值的方法检测环形直流微网的母线短路故障;文献[23]采用非迭代的方法处理故障电流数据实现短路故障的检测和定位。文献[21-23]均采用缩小比例实验平台方法,采用固态断路器隔离故障电路,以验证获取故障检测时间。故障检测时间主要取决于检测原理,同时与固态断路器关断速度、处理器速度及传感器等硬件单元均有关,故表 2 为各故障检测方法的短路故障响应时间,即本文所提的检测时间是指从

直流微网系统发生短路故障开始,直到故障线路被切断所需的时间。

表2 本文与早期研究方法对比

Table 2 Comparison of the proposed method with early studies

检测方法	动作时间/ms
本文	≤0.22
文献[20]	≤0.20
文献[21]	≤1.00
文献[22]	≤2.00
文献[23]	≤40.00

由表2检测时间数据可知,本文所提出的复合检测方法检测速度快,其实现方法为成熟短路故障检测方法的改进与复合,可靠性高。

5 结 论

本文研究了海上平台直流微网系统短路故障特性,结合海洋平台直流微网系统面积有限、线路较短的特点及短路故障快速检测的要求,提出了电流差动法和方向电流法相互补充的复合型短路故障检测方法,并在搭建海上平台直流微网系统模拟实验平台进行了验证。实验结果表明,母线故障检测时间仅为0.09 ms,支路故障检测时间约为0.22 ms,均可保证故障后,母线电压不会发生电压暂降,从短路故障发生到母线电压恢复所需时间不超过0.3 ms,验证了所提方法不但能快速检测短路故障的发生,而且能准确隔离故障电路,保证电力系统高可靠运行。

本文在差分电流法检测方法的基础上,在没增加检测传感器的情况下,利用系统单元与母线节点两侧传感器采集的数据,采用方向电流法的原理实现了系统单元短路故障检测的选择性,增加了系统线路短路故障的检测覆盖范围,且没有增加故障检测设备的成本。本文所提方法易适用于无人值守、高可靠性要求的远海平台直流电力系统的短路故障快速检测隔离。

参考文献

[1] 王项南,张原飞,夏海南,等. 我国自主研发潮流能发电装置的现场测试与评价分析[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(7):226-234.
WANG X N, ZHANG Y F, XIA H N, et al. Field test and evaluation of self-developed tidal power generation device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(7):226-234.

[2] 高艳波,李慧青,柴玉萍,等. 深海高技术发展现状

及趋势[J]. 海洋技术, 2010, 29(3):119-124.

GAO Y B, LI H Q, CHAI Y P, et al. Development status and trend of high technology for deep-sea [J]. Ocean Technology, 2010,29(3):119-124.

[3] MAO Z, XU X, LI J, et al. Simulation research of offshore wind farm VSC-HVDC three-Level converters for grid integration[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130:1146-1151.

[4] 吕枫,彭晓彤,周怀阳,等. 缆系海底观测网原型系统设计[J]. 仪器仪表学报,2012,33(5):1134-1140.

LYU F, PENG X T, ZHOU H Y, et al. Design of a prototype system for cabled seafloor observatory networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5):1134-1140.

[5] BARAN M E, MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22:406-412.

[6] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1045-1053.

[7] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):172-181.

[8] 金雪芬,戴朝波,武守远,等. 根据线路电流斜率快速识别故障信号的方法[J]. 电网技术, 2009(9):29-34.

JIN X F, DAI CH B, WU SH Y, et al. Fast fault signal identification method using line current slope[J]. Power System Technology, 2009(9):29-34.

[9] FLETCHER S D A, NORMAN P J, FONG K, et al. High-speed differential protection for smart DC distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2610-2617.

[10] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5):4303-4312.

[11] JOVICIC D, TAHERBANEH M, TAISNE J P, et al. Offshore DC grids as an interconnection of radial systems: Protection and control aspects[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2):903-910.

[12] LI H, CHEN M, YANG B, et al. Fast fault protection based on direction of fault current for the high-surety power-supply system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6):5787-5802.

[13] YEAP Y M, GEDDADA N, SATPATHI K, et al. Time-

- and frequency-domain fault detection in a VSC-interfaced experimental DC test system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10):4353-4364.
- [14] 谢仲润,邹贵彬,杜肖功,等. 基于真双极的 MTDC 电网直流线路快速保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1906-1915.
XIE ZH R, ZOU G B, DU X G, et al. Fast DC lines protection for symmetrical bipolar based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6):1906-1915.
- [15] 徐耀松,唐维,徐才宝,等. 基于 S 变换和 PSO-GRNN 的柔性直流输电线路故障测距方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(6):9-17.
XU Y S, TANG W, XU C B, et al. Fault location method for VSC-HVDC line based on ST and PSO-GRNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020,34(6):9-17.
- [16] 姚钢,纪飞鹏,殷志柱,等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16):163-170.
YAO G, JI F P, YIN ZH ZH, et al. Review on the research of DC power distribution power quality [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16):163-170.
- [17] 孙维蒙. 基于智能学习算法的电压暂降影响评估与定位研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2011.
SUN W M. Influence assessment and location research of voltage sags based intelligent algorithm [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2011.
- [18] 张林,邵能灵,刘剑,等. 直流微电网方向纵联保护方法研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(20):1-7.
ZHANG L, TAI N L, LIU J, et al. Analysis of directional pilot protection method for DC microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(20):1-7.
- [19] 王国玲,刘逸杰,李妍,等. 一种漂浮式海上雷达测风移动平台风光储直流微网系统:CN201921477301.8[P]. 2020-05-19.
WANG G L, LIU Y J, LI Y, et al. A DC microgrid system about wind light and storage of the floating wind measured by radar platform: CN201921477301.8 [P]. 2020-05-19.
- [20] SHAMSODDINI M, VAHIDI B, RAZANI R, et al. A novel protection scheme for low voltage DC microgrid using inductance estimation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120:105992.
- [21] EMHEMED A A S, FONG K, FLETCHER S, et al. Validation of fast and selective protection scheme for an LVDC distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1432-1440.
- [22] MOHANTY R, PRADHAN A K. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach[J]. IEEE Trans Smart Grid, 2017, 9(6):6328-6337.
- [23] PARK J D, CANDELARIA J, MA L, et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4):2574-2584.

作者简介



李振宇,2002 年和 2005 于长安大学分别获得学士学位和硕士学位,2020 年于华侨大学获得博士学位,现为集美大学讲师,主要研究方向为智能与精密检测技术,直流微网系统故障检测技术等。
E-mail: mysy@jmu.edu.cn

Li Zhenyu received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chang'an University in 2002 and 2005, and received his Ph. D. degree from Huaqiao University in 2020. He is currently a lecture at JiMei University. His research interests include precision testing, intelligent detection, and the DC microgrid fault detection technology.



王国玲(通信作者),2003 年于辽宁工业大学获得硕士学位,2012 年于福州大学获得博士学位,现为集美大学教授,主要研究方向为船舶与海上平台新能源微电网系统与控制,电力电子功率变换技术,直流微网系统故障检测技术等。

E-mail: wgl@jmu.edu.cn

Wang Guoling (Corresponding author) received her M. Sc. degree in 2003 from Liaoning University of Technology, and received her Ph. D. degree from Fuzhou University in 2012. She is currently a professor at JiMei University. Her main research interests include the stability and control of the marine and offshore new energy microgrid, power electronics conversion technology, and the DC microgrid fault detection technology.