

4-1-2022

Research on a current differential protection suitable for DC microgrid

Jiaojie LI

School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Yili LIU

School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Zhiyu SHEN

School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Cunlong FANG

State Grid Anhui Electric Power Company Chuzhou Power Supply Company, Chuzhou 239000, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

LI, Jiaojie; LIU, Yili; SHEN, Zhiyu; and FANG, Cunlong (2022) "Research on a current differential protection suitable for DC microgrid," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 37: Iss. 1, Article 7.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.007

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss1/7>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

一种适用于直流微网的电流差动保护

李佼洁¹, 刘毅力¹, 沈志雨¹, 方存龙²

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网安徽省电力有限公司滁州供电公司, 安徽 滁州 239000)

摘要: 直流微网线路发生故障时, 故障电流的迅速飙升对系统供电的可靠性极其不利, 因此快速检测并切除故障对其可靠运行至关重要。传统电流差动保护具有良好的速动性和选择性, 但其灵敏度受短路阻抗影响较大, 在高阻短路故障时可能出现拒动问题。在此背景下, 针对放射形直流微电网, 根据故障点两端电流变化特性, 引入低制动系数实现对高阻故障的检测, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建直流微网模型对保护方案进行仿真验证, 结果表明被保护线路发生不同短路阻抗故障时, 改进的保护方案均能够准确识别并切除故障。

关键词: 直流微网; 电流差动保护; 双斜率; 短路阻抗

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.007 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2022)01-0055-09

Research on a current differential protection suitable for DC microgrid

LI Jiaojie¹, LIU Yili¹, SHEN Zhiyu¹, FANG Cunlong²

(1. School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Company Chuzhou Power Supply Company, Chuzhou 239000, China)

Abstract: When a fault occurs on a DC microgrid line, the rapid surge of fault current is extremely detrimental to the reliability of the system power supply. Therefore, a quick fault detects and remove is important for the reliable operation of power supply. The traditional current differential protection has good quick rapidity and selectivity. However, its sensitivity is greatly affected by the short circuit impedance and may lead to the malfunction of protection under the high resistance short circuit fault. Aiming at the radial topology of DC micro-grids, according to the current variation characteristics at both sides of the fault point, a low braking coefficient is utilized to realize the detection of high resistance faults, and the protection scheme is simulated and verified by building a DC micro-grid model in PSCAD/EMTDC. The simulation results indicate that the improved protection scheme can accurately identify and remove the faults when different short-circuit impedance faults occur in the protected DC lines.

Key words: DC micro-grid; current differential protection; dual slope; short-circuit impedance

近年来,随着中国可再生能源产业的迅猛发展,以及电力系统中分布式电源(distributed generation, DG)渗透率的不断提升,正推动着微电网的建设规模逐渐壮大。直流微网作为一种新型组网方

式,可更加可靠地接纳各种分布式电源、负载及储能装置,对实现能源可持续发展具有重要意义,将成为未来智能电网的重要组成部分。然而,其拓扑结构的特殊性使得短路故障对系统安全构成极大的威

胁,目前发展已非常成熟的交流配网保护技术难以直接运用。因此直流微网的故障保护技术仍处于发展阶段,制约着直流微网的大规模推广和应用^[1-2]。

目前现有的保护方案主要可分为单端量保护和基于通信的保护^[3],单端量保护主要是利用电流、电压等电气量实现故障识别,需要通过复杂的整定和适当的延时实现上下级配合,如过电流保护、电流变化率保护^[4]等,对直流微网而言误动的可能性较大。文献[5]提出了基于暂态电流变化率绝对值的反时限保护方案,可通过自适应调节保护动作配合时间,达到快速切除故障的目的,但抗过渡电阻能力未知。基于通信的保护主要是利用智能装置切除和隔离故障,无需复杂的整定且具有绝对的选择性^[6]。文献[7]利用智能电子设备,配合电流差动保护对环形微网节点电流和断路器进行监控,可有效地实现故障隔离,但在高阻故障时灵敏性可能存在欠缺;文献[8]提出了基于母线功率变化率的新型差动保护,有效地解决了高阻短路保护拒动的问题,但由于潮流分布存在差异,此方法仅适用于环形直流微网。本文以低压放射形直流微网为研究对象,采用双斜率

电流差动保护作为主保护,欠电压保护和电流变化率保护作为后备保护,并基于 PSCAD 仿真软件验证此方案对于不同接地阻抗的有效性。

1 直流微网的故障分类及特征分析

放射形直流微网主要由光伏(DG)、储能装置(蓄电池)、换流器(AC-DC、DC-DC)和直流负载组成,如图 1 所示。图 1 中,公共连接点(point of common coupling,PCC)为大电网与微网并网的耦合点, L_1 、 L_2 分别为并网换流器和负载与直流母线相连的电缆线路,BRK1~8 为各支路的直流断路器。其中并网换流器为电压源型换流器(voltage source converter,VSC),采用对称单极接线方式便于故障检测。系统故障类型可大致分为极间短路故障和单极接地故障^[9]。在实际运行中,单极接地故障发生频率远大于极间故障,但后者对系统的危害更加严重。

由于采用的保护方案主要针对 VSC 整流侧故障,负载和 DG 支路不存在分段,仅需配置简单的过流保护即可,故不再详细展开阐述。

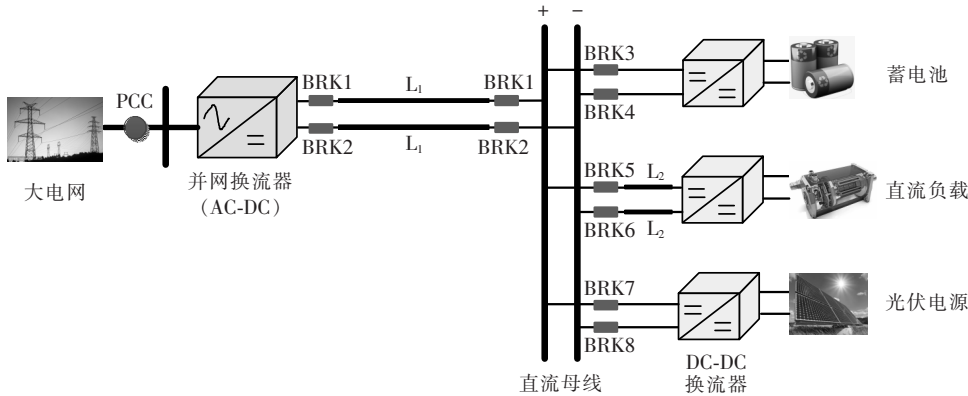


图 1 放射形直流微电网结构

Figure 1 Radial structure of DC micro-grid

1.1 极间短路故障分析

直流微网发生极间短路故障时,其等效电路如图 2 所示。图 2 中, R_0 、 L 分别为 VSC 到故障点的等效电阻和电感, R_f 为短路阻抗, C 为直流侧大电容, U_{dc} 为直流母线电压, $D_1 \sim D_6$ 为续流二极管。其暂态响应可分为 3 个阶段,如图 3 所示。

1) 电容放电阶段。在故障发生时刻,VSC 紧急

闭锁,直流侧大电容快速向故障点放电^[10], U_{dc} 迅速下降,故障电流迅速上升。此时有:

$$i_f = i_{vsc} + i_c \tag{1}$$

式中 i_f 为故障电流; i_{vsc} 为交流侧电流; i_c 为电容放电电流。

因 $i_c \gg i_{vsc}$,故交流侧电流可忽略不计,即 $i_f \approx i_c$,其等效电路如图 3 (a)所示。此时直流电容、

线路阻感及短路阻抗构成 RLC 二阶振荡电路,即

$$LC_{\text{eq}} \frac{du_c^2}{dt^2} + RC_{\text{eq}} \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (2)$$

式中 u_c 为直流侧电容电压; C_{eq} 为等效放电电容, $C_{\text{eq}} = C^2/2C = C/2$; R 为等效短路电阻, $R = R_0 + R_f$ 。对于直流微网,该故障回路通常为欠阻尼振荡,即 $R < 2\sqrt{L/C_{\text{eq}}}$ 。

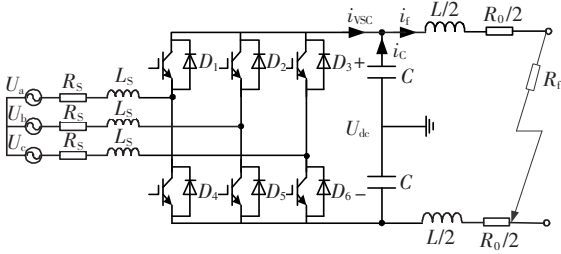


图 2 极间短路故障时 VSC 等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of VSC in inter-pole short circuit fault

若 U_0 和 I_0 分别为发生故障时 VSC 直流侧的初始电压和电流,则方程的解为

$$u_c(t) = \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C_{\text{eq}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \quad (3)$$

电容放电电流为

$$i_c(t) = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{U_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t \quad (4)$$

式中 ω 为角频率, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC_{\text{eq}}} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$; ω_0 为初始角频率, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_{\text{eq}}}$; β 为初始相位角, $\beta = \arctan\left(\frac{2\omega L}{R}\right)$ 。

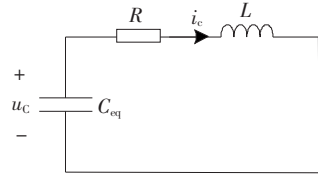
i_L 的时域表达式为

$$i_c(t) = e^{-\frac{R}{2L}t} \sqrt{\frac{C_{\text{eq}}}{L} U_0^2 + I_0^2} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC_{\text{eq}}} - \frac{R}{2L}} t + \arctan\left(\frac{I_0}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C_{\text{eq}}}}\right)\right) \quad (5)$$

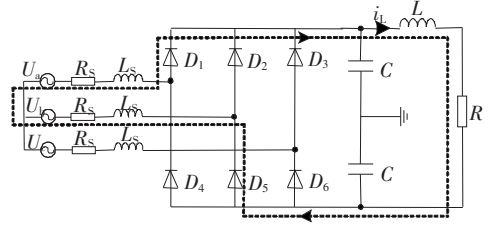
令 $\theta = \arctan\left(\frac{I_0}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C_{\text{eq}}}}\right)$, $A = \sqrt{\frac{C_{\text{eq}}}{L} U_0^2 + I_0^2}$, 由式 (5) 可得:

$$i_c(t) = A e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t + \theta) \quad (6)$$

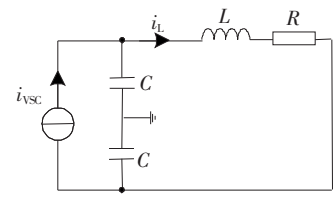
由式 (6) 可知, VSC 直流侧短路时, 初始电压 U_0 与电流 I_0 越大, 放电电流的峰值就越高。



(a) 电容放电阶段



(b) 二极管续流阶段



(c) 交流侧馈电阶段

图 3 极间短路故障暂态响应的 3 个阶段

Figure 3 3 stages of transient response of inter-pole short circuit fault

2) 二极管续流阶段。随着电容放电过程的进行, 电容端电压逐渐降至交流侧电压, 此时二极管承受正向电压而导通。与此同时电感放电, 此刻流经二极管的电流为电感放电电流与交流侧电源电流之和。该阶段可看作 RL 一阶回路, 如图 3(b) 所示。电感电流衰减规律为

$$i_L(t) = I'_0 e^{-(R/L)t} \quad (7)$$

式中 I'_0 为初始电感放电电流。由于电感放电电流的初值较大, 会使二极管中流过冲击性电流, 若其过流能力较低则会有损坏的可能。

3) 交流侧馈电阶段。当电容电压逐渐低于交流侧电压, 二极管开始流过反向电流, 系统进入交流侧馈电阶段, 等效回路如图 3(c) 所示, 相当于工作在交流侧短路状态。分析可知, 保护须在电容放电结束前动作, 以防故障范围的进一步扩大, 同时二极管须具备一定的过流能力。

1.2 单极接地短路故障分析

直流微网发生单极接地故障等效电路如图 4 所示, 回路①和②分别表示故障的 2 个阶段。

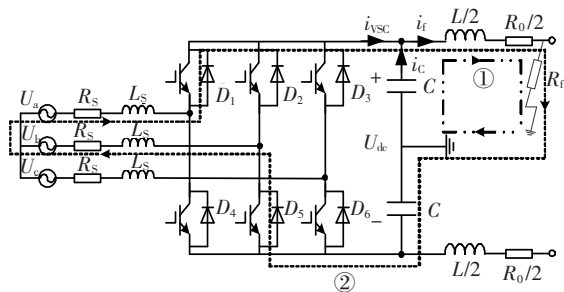


图 4 单极接地短路故障时 VSC 的等效电路

Figure 4 Equivalent circuit of VSC in a single-pole ground short circuit fault

由于大电容中性点接地,所以在电容放电阶段,故障阻抗接地点与电容中性点等电位,形成 RLC 二阶回路。而正负极的电容依旧各承担一半 VSC 整流后的电压,回路方程为

$$\frac{1}{2}LC \frac{du_c^2}{dt^2} + (\frac{1}{2}R_0 + R_f)C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (8)$$

式中 u_c 为正极电容电压。当 $\frac{1}{2}R_0 + R_f < \sqrt{\frac{2L}{C}}$ 时,电容放电为欠阻尼振荡;当 $\frac{1}{2}R_0 + R_f > \sqrt{\frac{2L}{C}}$ 时,电容放电为过阻尼振荡。该阶段结束以后进入二极管续流阶段,原理同极间故障第 2 阶段。

对于 2 种故障类型的电容放电阶段,当线路发生金属性短路,或短路阻抗较小时,为二阶欠阻尼振荡过程;当短路阻抗较大时,为二阶过阻尼振荡过程。由于极间短路故障以金属性故障为主,一般为欠阻尼过程;单极接地故障可能为欠阻尼或过阻尼过程^[11]。

2 保护方案

2.1 改进的电流差动主保护

由文第 1 节分析可知,2 种故障对微网系统和器件都具有一定危害性,其故障特性要求系统的保护装置动作更加准确迅速^[12]。由于直流微网线路较短,故障电流受短路阻抗变化的影响较大且特征相似,可能导致传统的过电流保护、电流速断保护、电流变化率保护等误动。而电流差动保护仅需考虑线路两端电流差值,整定容易,动作迅速且具有绝对的选择性^[13],因此可应用于直流微网线路的主保护中。

传统电流差动保护的判据为

$$\begin{cases} I_d > KI_{re} \\ I_d > I_q \\ I_d = |I_m + I_n| \\ |I_{re}| = |I_m - I_n| \end{cases} \quad (9)$$

式中 I_m 、 I_n 分别为被保护线路两端的电流,规定电流由母线指向被保护线路为正方向; I_d 为差动电流; I_{re} 为制动电流; K 为比率制动系数, $0 < K < 1$; I_q 为保护的启动值。

相比于极间短路故障,直流微网单极接地故障电流较小,对电力设备的危害度相对较轻。为保证差动保护不拒动,保护须尽可能识别由危害度较轻的故障引起的电流幅值变化,即高阻接地故障。而传统的差动保护须兼顾区外故障判定的可靠性,从而 K 值不能过低^[14],这很可能导致保护无法检测出由区内高阻故障产生的过小的差动电流,灵敏性偏低,不能及时切除故障。

为了实现对高阻故障的检测,本文采用双斜率电流差动保护作为主保护,即引入一级判定依据,保护逻辑如图 5 所示。其中, K_1 、 K_2 分别为高、低制动系数, Δt 为判据所需延时,其余物理量的含义同式(9)。

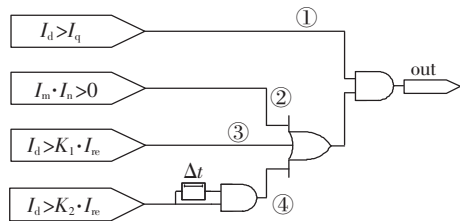


图 5 双斜率电流差动保护逻辑

Figure 5 Logic of double slope current differential protection

1)判据①用于开放保护,当差动电流达到启动值时开放,反之闭锁。对于正常运行和区外故障状态下的被保护线路,无论是单端供电还是双端供电,线路两端电流均等值反向,差动电流为 0,保护不动作。

2)判据②、③为低阻故障判据。发生区内低阻故障时,双端供电线路的故障点两端电流同向,判据②、③均满足,保护瞬时动作;对于单端供电线路,尽管故障点两端电流反向,但 I_d 和 I_{re} 会有明显的差值,满足判据③,保护同样会立即动作。

3)判据④为高阻故障判据。此情况下线路两端

电流反向,但存在一定的电流差,即 $I_m \neq I_n$,当装置检测到故障电流满足判据④,且持续时长 $\geq \Delta t$,则判定为区内高阻故障,保护动作,否则判定为系统扰动产生的不平衡电流。

4)其他情况则视为区外故障,保护不动作。需要说明的是,对于判据④,为了避免 K_2 设置过低造成区外故障保护误动,参考现有的微机差动保护装置,实际应用中 K_2 的取值通常按照线路 2 端电流互感器变比的最大误差为 10%来整定,取值范围一般为 0.2~0.5;延时 Δt 的设置是为了防止系统中的瞬时干扰造成保护误判,当且仅当满足延时条件判定为区内高阻故障时,保护才会动作。

2.2 欠电压与电流变化率相结合的后备保护

为了防止主保护拒动时危害系统安全,须配备后备保护作为第 2 道防线。由于在电流差动保护中增加了高阻判据,因此需要根据不同的故障类型及故障短路阻抗大小配备相应的后备保护。

1)当直流微网发生极间短路和单极接地故障时,并联二极管的过电流耐受能力有限,因此要求外部保护尽可能快速动作,其中极间短路故障的动作时限要求在 10 ms 之内^[15]。根据故障瞬间直流母线电压会迅速跌落这一特征,选用其电压幅值突变量作为欠电压保护的启动判据,理论上可满足 VSC 直流侧保护动作时限要求^[16]。其保护判据为

$$\begin{cases} U_r < U_{\text{set}} \\ U_{\text{set}} = 0.8U_{\text{dc}} \end{cases} \quad (10)$$

式中 U_r 为母线电压实际值; U_{set} 为欠电压保护整定阈值; U_{dc} 为直流母线额定电压。当直流母线电压下降至额定电压的 80%时,多数电气设备仍能正常工作^[17],因而设置整定值为正常运行期间母线电压的 0.8 倍。当检测到母线电压降低至整定阈值且经延时后仍未恢复至正常电压时,保护动作将故障线路切除。此处设置的延时时间应小于并联二极管的过电流耐受时间。

2)当直流微网发生单极高阻接地故障时,其直流母线电压仅表现为微小的波动,欠电压保护不会动作。相较于低阻故障,高阻故障时电流不会出现很高的峰值,但依旧会以很高的速率上升,因此可以根据故障电流变化率特性配置对应的后备保护^[18]。其保护判据为

$$\begin{cases} |di_f/dt| > |di_f/dt|_{\text{set}} \\ |di_f/dt|_{\text{set}} = K_{\text{rel}} |di_f/dt|_{\text{max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $|di_f/dt|$ 为故障电流变化率的绝对值; $|di_f/dt|_{\text{set}}$ 为电流变化率的整定值; K_{rel} 为可靠系数,一般取 0.9~0.95; $|di_f/dt|_{\text{max}}$ 为高阻故障时线路末端出现的最大电流变化率的值。作为主保护高阻判据对应的后备保护,其设置的延时应大于电流差动保护高阻判据的动作时间。

综上,保护判据流程如图 6 所示。

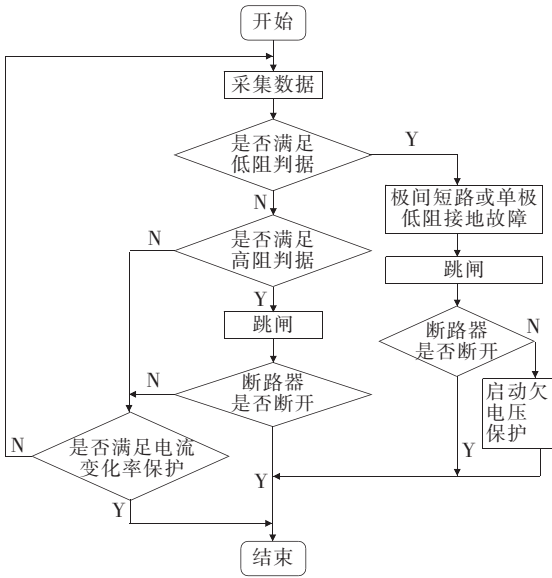


图 6 保护判据流程
Figure 6 Flow chart of protection criteria

3 仿真验证

为了验证上文所述保护方案的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了放射形直流微网模型,如图 1 所示,其仿真参数如表 1 所示。

表 1 直流微网仿真参数
Table 1 Simulation parameters of DC micro-grid

参数	单位	数值
直流母线电压	V	400
L_1 线路等效电阻	Ω	0.112
L_1 线路等效电感	mH	0.56
L_1 线路长度	km	1
直流侧等效电容	mF	5
蓄电池组容量	Ah	100
光伏阵列输出功率	kW	135
直流负载	kW	300
系统并网有功功率	kW	220
系统并网无功功率	kvar	0

主保护和后备保护通过逻辑“或”相连,构成一整套保护共同作用于断路器 BRK1、BRK2。各保护参数设置如下:对于主保护,差动保护启动定值 $I_q=5\text{ A}$,高制动系数 $K_1=0.4$,低制动系数 $K_2=0.2$,故障判定延时 $\Delta t=50\text{ ms}$;对于后备保护,欠电压保护整定阈值 $U_{\text{set}}=320\text{ V}$,延时设置为 1 ms ;电流变化率保护的可靠系数 K_{rel} 取 0.9 ,延时时间设置为 60 ms 。

3.1 区外故障和区内瞬时故障验证

为了验证所采用保护方案的可靠性, $t=0.6\text{ s}$ 时,在 L_2 线路设置区外故障, $R_f=0.2\text{ }\Omega$,持续 0.2 s ; $t=1\text{ s}$ 时,在 L_1 线路设置瞬时性接地故障, $R_f=1\text{ }\Omega$,持续 0.02 s ,仿真结果如图 7 所示。

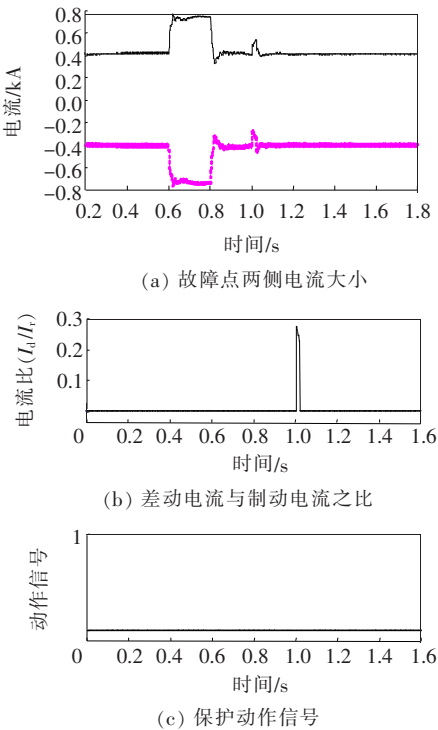


图 7 区外故障和瞬时故障仿真结果
Figure 7 Out-of-area and instantaneous fault simulation results

由图 7 可知,区外故障时故障点两侧电流出现明显变化,但由于故障点两侧电流等值反向, $I_d=0$,故保护无跳闸信号;第 2 次故障虽然达到差动保护高阻判据的制动系数,但故障持续时间过短,未达到高阻判据的延时,因此可判定为系统瞬时扰动产生的不平衡电流所致,保护不动作。由此可见,对于区外故障和区内瞬时故障,保护均不会误动,满足了保护的可靠性要求。

3.2 极间短路故障及低阻接地故障验证

为验证差动保护低阻判据和欠电压保护可以实

现有效地配合,以 L_1 线路中点处发生正极接地故障和极间短路故障为例进行仿真,其中正极接地和极间短路的故障阻抗均为 $R_f=0.1\text{ }\Omega$,故障发生时间均为 $0.6\sim 0.8\text{ s}$,仿真结果如图 8、9 所示。

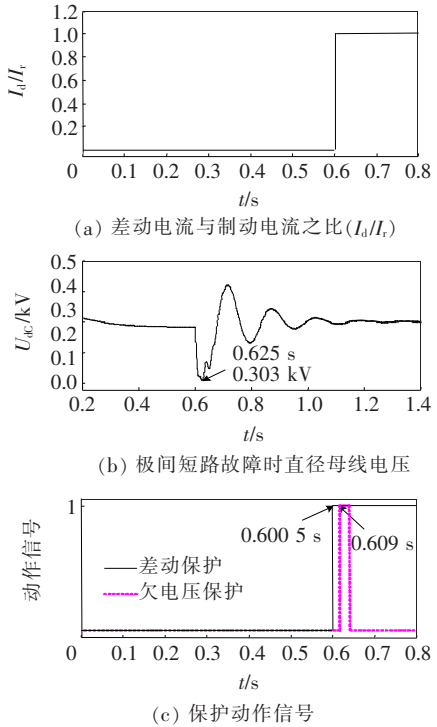


图 8 极间短路故障仿真
Figure 8 Simulation of inter-pole short circuit fault

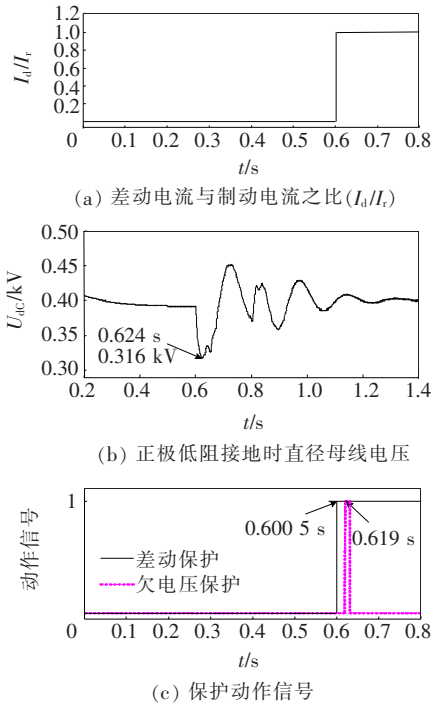


图 9 正极低阻接地故障仿真
Figure 9 Simulation of positive low resistance grounding fault

由图 8 可知,发生极间短路故障时,差动电流与制动电流之比接近 1,满足电流差动保护的低阻判据,保护于 $t=0.600\ 5\ \text{s}$ 时变为高电平;对于后备保护, $t=0.625\ \text{s}$ 时, U_{dc} 降至最低值 $0.303\ \text{kV}$,欠电压保护在 $t=0.609\ \text{s}$ 时出现动作信号。由此可见,主保护在极间故障发生后的 $0.5\ \text{ms}$ 迅速动作,可有效地防止故障范围进一步扩大;若差动保护拒动,欠电压后备保护也可在故障发生后的 $9\ \text{ms}$ 迅速切除故障,满足直流微网保护的動作时限要求。

由图 9 可知,发生正极低阻接地故障时,同样会产生很大的差动电流和很小的制动电流, $I_{\text{d}}/I_{\text{r}}$ 比值接近于 1,满足主保护低阻判据,保护立即动作;在 $t=0.624\ \text{s}$ 时,直流母线电压 U_{dc} 降至最低值 $0.316\ \text{kV}$,欠电压后备保护在 $t=0.619\ \text{s}$ 时变为高电平。对比以上 2 种故障可发现,在接地阻抗大小相同的情况下,极间短路故障的影响范围更大,其对

于保护时限的要求也更加严苛,而故障时母线电压发生突变这一特征,为欠电压后备保护配置提供了可行性保证。

3.3 线路不同位置发生高阻接地故障验证

为验证电流差动保护高阻判据可以有效地提高保护对于高阻故障的灵敏度,对 L_1 不同位置发生正极高阻接地故障(故障持续时间均为 $0.2\ \text{s}$)的情况进行仿真,差动电流与制动电流的比值($I_{\text{d}}/I_{\text{r}}$)、传统差动保护以及改进的保护动作情况如表 2 所示。 L_1 线路中点发生正极接地故障时 $I_{\text{d}}/I_{\text{r}}$ 与短路阻抗 R_{f} 的关系以及双斜率电流差动保护与传统电流差动保护的動作区域如图 10 所示。

由表 2 和图 10 可知,随着 R_{f} 的增大, $I_{\text{d}}/I_{\text{r}}$ 与其呈负相关,且衰减逐渐变得缓慢。传统差动保护仅在 R_{f} 较小时能可靠动作,抗过渡电阻能力较弱;而改进后的电流差动保护在较大的 R_{f} 情况下仍能

表 2 高阻接地故障保护动作情况对比

Table 2 Comparison of protective actions under high resistance fault

故障点位置	临界短路阻抗值/ Ω	短路阻抗/ Ω	差动电流与制动电流之比($I_{\text{d}}/I_{\text{r}}$)	差动保护动作情况	
				传统	改进
L_1 首端	0.00	0.2	0.894	立即动作	立即动作
		0.4	0.561	立即动作	立即动作
		0.6	0.411	立即动作	立即动作
		0.8	0.333	不动作	延时 50 ms 动作
		1.1	0.255	不动作	延时 50 ms 动作
		1.3	0.220	不动作	延时 50 ms 动作
		1.5	0.193	不动作	不动作
L_1 中点	0.28	0.3	0.643	立即动作	立即动作
		0.5	0.435	立即动作	立即动作
		0.6	0.375	不动作	延时 50 ms 动作
		0.8	0.294	不动作	延时 50 ms 动作
		1.0	0.243	不动作	延时 50 ms 动作
		1.2	0.206	不动作	延时 50 ms 动作
		1.4	0.180	不动作	不动作
L_1 末端	0.36	0.4	1.000	立即动作	立即动作
		0.5	0.411	立即动作	立即动作
		0.7	0.307	不动作	延时 50 ms 动作
		0.8	0.280	不动作	延时 50 ms 动作
		0.9	0.245	不动作	延时 50 ms 动作
		1.0	0.221	不动作	延时 50 ms 动作
		1.2	0.186	不动作	不动作

可靠识别故障并动作,其灵敏度显著高于传统电流差动保护。

此外,本文还对电流变化率保护的有效性进行了验证。以 L_1 中点在 $t=0.6\text{ s}$ 发生正极故障为例, $R_f=0.6\ \Omega$,动作值按线路末端故障的最大电流变化率整定为 16.2 A/s 。测得的电流变化率和保护动作情况如图 11 所示。由图 11 可知, L_1 中点发生故障时,电流变化率最高可达 84 A/s ,当主保护因为某些原因无法正常动作时,电流变化率后备保护于 $0.660\ 5\text{ s}$ 时动作,实现了直流微网单极高阻接地短路故障的保护,以及与主保护高阻判据动作时序的配合。此外比较表 2 和图 11 可知,差动保护能识别的短路阻抗大小范围随故障点距离的增大而略有缩小,但影响远小于电流变化率保护。

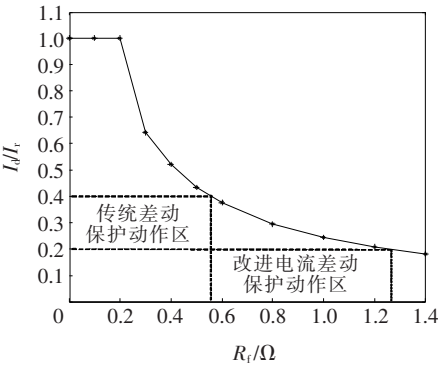


图 10 L_1 中点发生单极短路时 I_d/I_r 与 R_f 的关系及保护动作范围对比

Figure 10 Relationship between I_d/I_r and R_f and the scope of protective action in case of single pole short circuit at L_1 midpoint

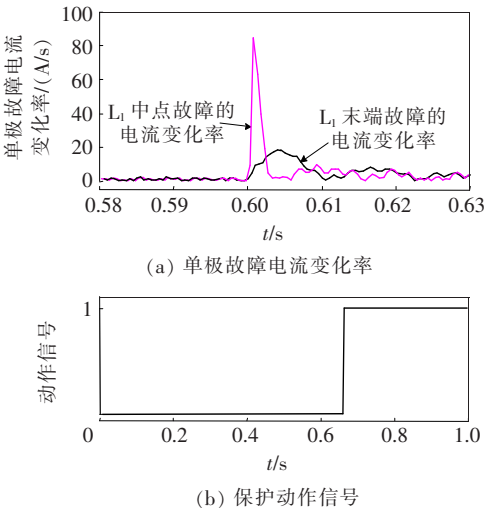


图 11 $R_f=0.6\ \Omega$ 时电流变化率与保护动作情况

Figure 11 The current change rate and protection action when $R_f=0.6\ \Omega$

4 结语

针对直流微网的传统电流差动保护在高阻故障时拒动的问题,采用双斜率电流差动保护实现对区内高阻故障的检测,并根据高、低阻判据分别配置了相应的后备保护,最后通过仿真设置不同类型、不同位置、不同短路阻抗的线路故障,结果表明,改进的保护方案几乎不受故障类型及故障点位置影响,可快速、准确识别故障,对于区内高阻故障有较高的灵敏度,提高了直流微网的供电可靠性,同时也为实际运用提供了参考。

参考文献:

[1] 郑宽,徐志成,鲁刚,等. 高比例新能源电力系统演化进程中核电与新能源协调发展策略[J]. 中国电力, 2021, 54(7):27-35.

ZHENG Kuan, XU Zhicheng, LU Gang, et al. Coordinated development strategy for nuclear power and new energy in the evolution process of power system with high penetration of new energy [J]. Electric Power, 2021, 54(7):27-35.

[2] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5):216-222.

WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):216-222.

[3] 李勃,张孝军,徐宇新,等. 基于本地信息的有限选择性直流微电网保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(1):48-55.

LI Bo, ZHANG Xiaojun, XU Yuxin, et al. Protection scheme with limited selectivity for DC microgrid based on local measurements [J]. Smart Power, 2021, 49(1):48-55.

[4] 曹喆,季亮,常潇,等. 基于复合故障补偿因子的微电网反时限电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20):133-140.

CAO Zhe, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Inverse-time current protection method of a microgrid based on a composite fault compensation factor [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20):133-140.

[5] 刘鑫蕊,谢志远,孙秋野,等. 低压双极性直流微网故障分析及保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3):749-755.

- LIU Xinrui, XIE Zhiyuan, SUN Qiuye, et al. Fault analysis and protection for lv bipolar DC microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 749-755.
- [6] 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 Lin, TAI Nengling, LIU Jian, et al. Analysis of directional pilot protection method for DC microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(20): 1-7.
- [7] PARK J D, CANDELARIA J, MA L Y, et al. DC ring-bus micro-grid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [8] 张伟亮, 张辉, 支娜, 等. 环形直流微电网故障分析与保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 105-112.
- ZHANG Weiliang, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Fault analysis and protection of circular DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 105-112.
- [9] 吉兴全, 孙灏, 陈尔奎, 等. 基于电流差动的直流配电网保护方案[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 51-56.
- JI Xingquan, SUN Hao, CHEN Erkui, et al. Protection scheme of DC distribution network based on differential current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 51-56.
- [10] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.
- LV Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.
- [11] 李剑薇, 李云阁, 朱浩男, 等. IEC 60071-2 中接地故障因数的理解和扩展[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 1-8.
- LI Jianwei, LI Yunge, ZHU Haonan, et al. Comprehension and extension of earth fault factor in IEC 60071-2 [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 1-8.
- [12] 王毅, 于明, 张丽荣. 环形直流微网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 7-14.
- WANG Yi, YU Ming, ZHANG Lilong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 7-14.
- [13] 康保林, 高亮, 屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 130-136.
- KANG Baolin, GAO Liang, QU Zicheng. Research on DC faults analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 130-136.
- [14] 王斌, 龙军. 双斜率电流差动保护在微电网中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(3): 764-770.
- WANG Bin, LONG Jun. The application of dual-slope current differential protection in microgrids[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2016, 41(3): 764-770.
- [15] 王成, 秦文萍, 韩肖清, 等. 环形直流配电网保护方法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 86-94.
- WANG Cheng, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Research on protection method for ring DC distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 86-94.
- [16] 李智诚, 和敬涵, 王小君, 等. 直流微电网的故障分析与保护配置研究[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(2): 62-68.
- LI Zhicheng, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. DC microgrid fault analysis and protection configuration research[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(2): 62-68.
- [17] 于洋, 孙辉, 方照, 等. 配电网保护通信时延需求约束的 5G 通信切片接入优化研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 29-34.
- YU Yang, SUN Hui, FANG Zhao, et al. Research on 5G communication slice access optimization with communication delay demand constraint of distribution network protection[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 29-34.
- [18] 谢冉冉. 直流微网故障特性分析及保护研究[D]. 山东: 山东大学, 2019.