

# 放射直流微电网短路故障保护策略

张伟亮<sup>1</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>, 支娜<sup>1</sup>, 王韩伟<sup>1</sup>, 杜明桥<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 清华大学 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**考虑直流微电网故障电流突增、电压突降特性,提出基于支路两端导纳差值导数的保护方法。通过检测支路两端的电流和电压,计算支路两端导纳的差值并求导,以支路导纳差值的导数作为故障判据,该判据充分利用了故障线路电压和电流参量,提高了保护灵敏度,且导纳差值的导数在故障发生初始阶段最大,可快速与动作阈值比较,判断故障发生与否,减少了故障检测时等待电流或电压变化至阈值的时间。将所提保护方法与过电流保护和低电压保护进行对比,结果证实了所提方法在速动性、灵敏性和保护范围方面性能更好。

**关键词:**直流微电网;故障检测;导纳;灵敏度;速动性

**中图分类号:**TM 73;TM 727

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202104027

## 0 引言

随着可再生清洁能源与智能电网相关建设的推进,柔性直流输电技术日趋成熟,直流微电网契合智能电网发展需求,已逐步成为未来能源互联网的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。直流微电网通常由分布式微源、储能、保护监控和交直流负荷构成<sup>[3-4]</sup>。直流微电网运行灵活,易扩充,但含有大量电力电子设备,运行工况复杂,短路电流冲击大且不存在过零点,使得故障检测与切除尤为困难<sup>[5]</sup>,因此快速可靠地检测并切除故障是直流微电网推广的关键技术之一<sup>[6-8]</sup>。目前直流固态断路器已可在微秒级时间内切断短路电流,而故障检测时间多数仍在毫秒级<sup>[9]</sup>,因此研究直流微电网故障检测方法,减少保护动作时间,具有重要意义。

直流微电网架构主要分为放射状、环状以及网状架构<sup>[10]</sup>。国内外已有学者分别针对不同架构直流微电网的保护策略开展研究,思路主要是优化网络拓扑,引入智能装置或保护算法,然后根据故障电流或电压特性,以电流或电压为参考值,设定相应的动作阈值以识别故障工况,进而下达相应的控制指令来隔离或切除故障,避免故障的扩大,提高系统的稳定性。文献[11-13]提出了不同的限流措施,以降低故障电流对电力电子装置的冲击,同时对直流系统进行潮流控制,限制故障电流上升速度并切断故障电流;文献[14]针对环形直流微电网,采用电流差动保护作为主保护、欠电压保护作为后备保护方案,可

有效检测区内故障,但受短路阻抗影响较大,据此,文献[9]提出基于功率变化率的差动保护,降低了短路电阻对保护的影响,提高了保护灵敏度且可在百微秒级的时间内检测并切除故障,但该方法及文献[14]中的方法均不适用于放射直流微电网。文献[15]为提高放射直流微电网保护的灵敏度,采用横联保护并引入电阻限流器,扩大了保护范围;文献[16]利用限流电抗器暂态电压比,实现对故障的检测与识别;文献[17]采用外部串联电感检测直流故障,利用接地电流检测高阻抗接地故障,该保护方法可以检测出接地阻抗小于 $25\ \Omega$ 的接地故障,其平均检测时间为 $1.25\ \text{ms}$ ,提高了故障定位的精度和灵敏度,但由于串联电抗的存在,短路电流上升变慢,增加了故障检测时间,致使其速动性下降;文献[18]提出采用熔断器作为低压直流微电网的保护策略,其结构简单,价格低廉,但为了保证可靠性和快速性,需要配备较大容量的储能电容,确保在发生故障时,提供足够大的电流让熔断器迅速熔断,然而过大的尖峰电流会对系统造成较大的冲击,对电力电子设备不利,同时需要较多的储能电容,且在发生高阻抗短路故障时,储能放电电流减小,造成保护不能快速切除故障;文献[19]为了保证直流微电网保护的选择性,提出了一种直流微电网单元保护方案,利用线段两端的叠加故障电流区分内部和外部故障。

以上文献通过改变拓扑或引入限流装置,降低发生故障时电流突增对电力电子装置的破坏,一定程度上提高了直流微电网的可靠性,但是网络拓扑的改变或限流装置的引入增加了电流上升至阈值的时间,降低了保护的速动性。对于基于故障电流量或电压量的保护,故障值达到阈值需要一定的时间,所以无法在故障发生瞬间识别并切除故障,且基于故障电流量或电压量的保护只是单一地利用故障电流或电压量,不利于灵敏度的提高,据此,本文针对

收稿日期:2020-11-16;修回日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51877175,52077176);  
陕西省重点研发计划资助项目(2017ZDXM-GY-003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877175,52077176) and the Key Research and Development Plan of Shaanxi Province(2017ZDXM-GY-003)

放射直流微电网,提出基于支路两端导纳差值导数的故障检测方法,利用支路电流与电压,求解支路两端导纳差值的一阶导数,将其作为判断故障、保护动作的整定量,充分利用了线路故障参量,提高了保护灵敏度,且导纳差值的导数在故障发生时刻最大,可立即判断是否发生了故障,缩短了电流或电压变化量达到阈值的时间,实现了故障的瞬时识别。相比以电流量或电压量构成的保护,本文方法具有更好的速动性和更高的灵敏性。最后通过仿真验证了本文方法的有效性。

## 1 放射直流微电网短路故障与支路导纳分析

放射直流微电网的结构示意图如图1所示,其由光伏阵列、风电机组、储能装置、本地负荷以及并网变换器等组成。并网变换器连接交流电网,在直流微电网发生故障后,其保护由交流主网执行,光伏阵列、风电机组及储能装置自身故障则由其自身器件保护执行相应的动作。本文主要针对放射直流微电网线路短路故障进行保护研究。

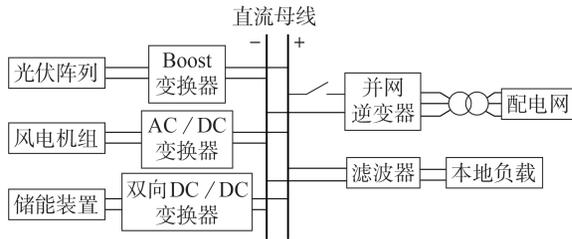


图1 放射直流微电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of radial DC microgrid

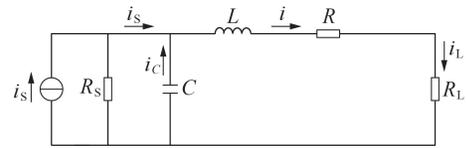
放射直流微电网线路短路故障主要包含母线到负荷间(负荷支路)短路故障、分布式微源到母线间(分布式微源支路)短路故障以及储能到母线间(储能支路)短路故障。放射直流微电网稳态运行及短路故障等值电路如图2所示。图中, $R$ 、 $L$ 和 $C$ 分别为直流微电网等效电阻、电抗和母线电容; $i_s$ 、 $R_s$ 分别为直流微电网等效电流和电阻; $i_{sj}$ 、 $R_{sj}$ 分别为微源 $j$ 的等效电流和电阻; $R_f$ 和 $R_l$ 分别为短路阻抗和负荷电阻; $R_1$ 、 $R_2$ 与 $L_1$ 、 $L_2$ 分别为支路短路故障点到线路两端的电阻与电抗值; $i_1$ 、 $i_2$ 为发生支路短路故障时,支路两端流入短路点的电流; $i$ 、 $i_c$ 、 $i_l$ 和 $i_f$ 分别为支路电流、母线电容电流、负荷电流和短路电流; $u_{bus}$ 、 $i_{bus}$ 分别为母线电压和电流。

直流微电网稳态运行时,其等值电路如图2(a)所示,此时各支路电流关系如式(1)所示。

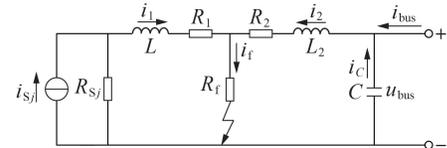
$$i_c + i_s = i_l \quad (1)$$

稳态运行时,母线电容电流很小,可忽略,可得故障前直流母线负荷侧导纳为:

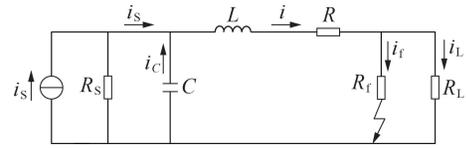
$$Y_0 = \frac{i_l}{u_0} = \frac{1}{R + R_l} \quad (2)$$



(a) 稳态



(b) 分布式微源或储能支路短路故障



(c) 负荷支路短路故障

图2 放射直流微电网等值电路

Fig.2 Equivalent circuits of radial DC microgrid

其中, $u_0$ 和 $Y_0$ 分别为稳态时负荷电压和导纳。

当发生短路故障时,母线电压迅速下降,等效微源和电容通过母线向短路点注入电流,电流突增,变换器可进行自我保护,电流则通过变换器续流二极管续流,由于电流较大,存在烧毁二极管的风险,如故障未能及时切除,则进入系统激励状态,此时,过大的电流将导致主网及各微源的保护动作,造成整个直流微电网的瘫痪。故障发生瞬间,支路电流和电压关系为:

$$i_c + i_s = i_f + i_l \quad (3)$$

短路故障发生前, $i_s \approx i_l$ ;短路故障初始阶段,电容放电电流远大于微源等效输出电流,故 $i_c \approx i_f$ ,则 $R$ 、 $R_f$ 、 $L$ 、 $C$ 组成二阶振荡电流,暂态方程如式(4)所示,求解式(4)可得式(5)。

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + (R + R_f)C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} z_1 = -\frac{R + R_f}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R + R_f}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \\ z_2 = -\frac{R + R_f}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R + R_f}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $u_c$ 为母线电容电压; $z_1$ 、 $z_2$ 分别为式(4)的正、负特征根。

由式(4)和式(5)可解得母线电容电压表达式为:

$$u_c = \frac{u_0}{z_2 - z_1} z_2 e^{z_1 t} - z_1 e^{z_2 t} \quad (6)$$

由式(6)解得负荷侧电流为:

$$i_c = -C \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_0}{L(z_2 - z_1)} (e^{z_1 t} - e^{z_2 t}) \quad (7)$$

则可由式(6)、(7)求得直流母线负荷侧瞬时暂态导纳  $Y$  的表达式为:

$$Y = Y_0 + \frac{i_c}{u_c} = Y_0 + \frac{e^{z_2 t} - e^{z_1 t}}{L(z_2 e^{z_1 t} - z_1 e^{z_2 t})} \quad (8)$$

对式(8)求导可得:

$$Y' = \left( Y_0 + \frac{i_c}{u_c} \right)' = \frac{1}{L} \frac{(z_2 - z_1)^2 e^{(z_1 + z_2)t}}{(z_2 e^{z_1 t} - z_1 e^{z_2 t})^2} \quad (9)$$

## 2 基于支路两端导纳差值导数的保护整定

基于支路两端导纳差值导数判据框图如图 3 所示。图中,  $H$  为故障判据系数;  $Y'_{op}$  为基于支路两端导纳差值的保护的的动作值;  $dY$  为被保护支路两端导纳差值;  $u_1, u_2$  为支路两端电压。首先计算支路首、末端导纳并作差, 得到支路首、末端导纳差值然后求其导数, 将该导数与  $Y'_{op}$  作差得到  $H$ 。当该导数大于  $Y'_{op}$  时,  $H > 0$ , 保护动作。与基于单一电压或电流的保护方法相比, 本文所提保护方法具有更高的灵敏度, 同时, 基于支路两端导纳差值导数的判据可在短路故障瞬间对运行工况的改变做出判断, 提高了保护的速动性。

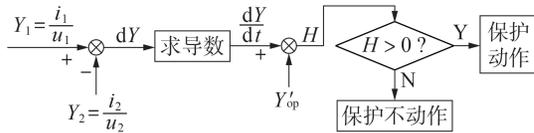


图 3 基于支路两端导纳差值导数的保护框图

Fig.3 Block diagram of protection based on derivative of admittance difference between two sides of branch

### 2.1 保护判据

基于基于支路两端导纳差值导数的判据为:

$$H > 0 \quad (10)$$

$$\begin{cases} H = \frac{dY}{dt} - Y'_{op} \\ dY = \frac{i_1}{u_1} - \frac{i_2}{u_2} = \frac{i_1 u_2 - i_2 u_1}{u_1 u_2} \end{cases} \quad (11)$$

放射直流微电网的短路故障中, 负荷支路短路故障可等效为双端输入网, 微源支路短路故障可等效为单端输入网, 如图 4 所示。

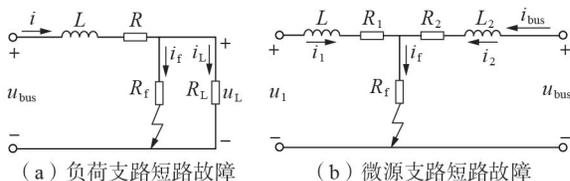


图 4 放射直流微电网支路短路故障等值电路

Fig.4 Circuit of branch short circuit faults of radial DC microgrid

负荷支路发生短路故障时, 短路阻抗与负荷阻抗并联, 其两端的瞬时导纳差值为:

$$\begin{cases} dY = \frac{i_1}{u_1} - \frac{i_2}{u_2} = \frac{i}{u_{bus}} - \frac{i_L}{u_L} \\ i_L = \frac{R_f}{R_f + R_L + R_2} i \\ u_L = \frac{R_f // (R_L + R_2)}{R_1 + R_f // (R_L + R_2)} u_{bus} \end{cases} \quad (12)$$

同理, 当微源支路发生短路故障时, 其两端的瞬时导纳差值为:

$$dY = \frac{i_1}{u_1} - \frac{i_2}{u_2} = \frac{i_1}{u_1} - \frac{-i_2}{u_{bus}} \quad (13)$$

基于式(12)、(13)进行如下分析。

(1) 工况 1: 微源支路或负荷支路正常运行。此时, 该支路功率无论是恒定还是发生改变, 支路两端电压、电流均存在如下关系:

$$u_1 = u_2 + Ri_1 \quad (14)$$

$u_1 > u_2, i_1 = i_2$ , 则  $dY < 0, H < 0$ , 保护不动作;

(2) 工况 2: 微源或负荷支路区外短路故障。同理可得,  $u_1 > u_2, i_1 = i_2, dY < 0, H < 0$ , 保护不动作。

(3) 工况 3: 微源支路区内发生短路故障,  $u_1 \approx u_2, i_1 = -i_2, dY \gg 0, H > 0$ , 保护动作; 负荷支路区内短路故障,  $u_1 > u_2, i_1 > i_2, dY > 0$ , 且  $dY/dt > Y'_{op}, H > 0$ , 保护动作。

由上述分析可知, 支路正常运行或支路区外短路故障情况下, 支路导纳发生改变, 但两端导纳差值不变,  $H < 0$ , 因此, 本文所提的保护方法不受功率变化和支路区外故障的影响; 微源支路区内短路故障情况下, 支路两端电压、电流大小改变, 且电流方向相反,  $H > 0$ , 保护动作, 切除该支路; 负荷支路区内短路故障情况下, 发生金属性短路故障时, 支路末端电压、电流改变, 但支路末端导纳不变, 而首端电压突降, 电流突增, 首端导纳突增, 则支路两端导纳差值突变,  $H > 0$ , 保护动作, 随着短路电阻的增大, 支路两端导纳差值减小, 当短路电阻增大到一定程度时,  $H \approx 0$ , 此时保护可能无法识别故障, 则该值是负荷支路保护临界值, 负荷支路短路阻抗应小于临界值。

### 2.2 阈值整定

直流微电网接地故障通常分为单极接地短路和极间短路故障, 在相同的参数和运行工况下, 单极接地短路电流小于极间短路电流, 因此, 若本文所提保护方法能有效切除单极接地故障, 则对极间短路故障同样有效。根据国家电力行业标准规定, 在配电系统中, 母线到负荷、微源到母线的允许压差分别为  $\pm 7\%、\pm 5\%$  [20], 为保证本文所提保护方法的可靠性, 其整定值应避开正常运行时各支路首、末端压差引起导纳变化的最大误差, 即:

$$Y'_{op} > \max\{Y'_{un1}, Y'_{un2}\} \quad (15)$$

其中,  $Y'_{un1}$ 、 $Y'_{un2}$  分别为负荷支路和微源支路首、末端压差引起的导纳差值的导数。

通常  $Y'_{un1} > Y'_{un2}$ , 则有:

$$Y'_{op} = K \frac{dY_{un1}}{dt} = K \frac{d\left(\frac{i_2}{0.93u_1} - \frac{i_1}{u_1}\right)}{dt} = 0.07K \frac{dY_N}{dt} \quad (16)$$

其中,  $K$  为可靠系数, 取值为  $1.5^{[9]}$ ;  $Y_{un1}$  为负荷支路首、末端压差引起的导纳差值;  $Y_N$  为负荷额定导纳。

此外, 为避免保护拒动, 保证其在发生单极高阻抗接地短路故障时有足够的灵敏度, 应使得保护能够识别短路电流最小时导纳差值的导数, 即:

$$\frac{Y'_{f.min}}{Y'_{op}} > K_{sen} \quad (17)$$

其中,  $Y'_{f.min}$  为保护可识别的最小短路电流对应的导纳差值导数;  $K_{sen}$  为灵敏度系数, 取值为 1.3。

### 3 仿真验证

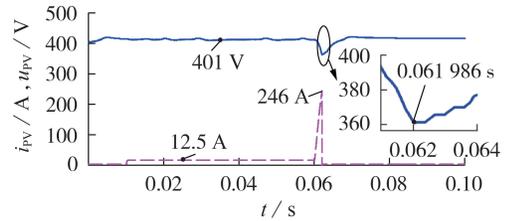
基于 MATLAB2017a / Simulink, 构建图 1 所示的 20 kW、400 V 放射直流微电网模型以验证本文所提方法的有效性。具体仿真参数为: 直流母线电压  $u_{bus}$  为 380~420 V; 光伏、风机、蓄电池的输出功率分别为 5、10、5 kW;  $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为  $0.1 \Omega$ 、 $1 \text{ mH}$  和  $2200 \mu\text{F}$ ;  $R_f$  为  $0.01 \sim 60 \Omega$ 。

#### 3.1 保护速动性验证

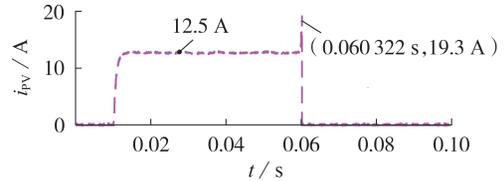
保护需要尽快检测并切除短路故障, 避免故障扩大以致烧毁电力电子器件。为验证本文所提保护方法具有更好的速动性, 仿真中将基于电流量和电压量的过电流保护和低电压保护作为对比。

在 0.01 s 时, 突加 16 kW 负荷, 负荷支路电流为 40 A, 光伏输出功率为 5 kW、电流为 12.5 A, 风机输出功率为 10 kW、电流为 25 A, 储能输出功率为 1 kW、电流为 2.5 A; 在 0.06 s 时, 光伏支路发生  $R_f=0.5 \Omega$  的短路故障。对应的仿真波形如图 5 所示。图中,  $i_{pv}$ 、 $u_{pv}$  分别为光伏支路的电流、电压; 图中给出了部分点的横、纵坐标作为参考。由图 5(c) 可见, 0.03 s 时光伏支路受到扰动, 峰值电流达到 18.3 A; 0.06 s 时光伏支路发生短路故障, 支路末端电流方向改变。由图 5(d) 可见, 在突加负载和受到扰动时, 本文保护方法的判据  $H < 0$ , 保护均不动作; 0.06 s 时  $H > 0$ , 保护在约 136  $\mu\text{s}$  的时间内切除故障。相同的参数设置下, 负荷支路短路故障的仿真波形见图 6。图中,  $u_l$  分别为负荷支路的电压。

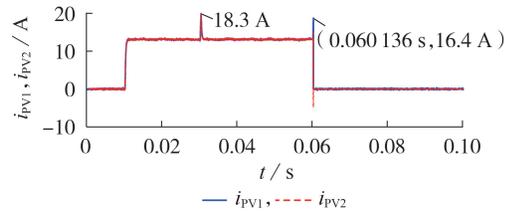
表 1 为在光伏支路和负荷支路短路故障下, 3 种保护方法切除故障支路的时间及故障支路承受的最大冲击电流。由表 1 可知, 本文所提保护方法在速动性上远优于低电压和过电流保护, 降低了短路冲



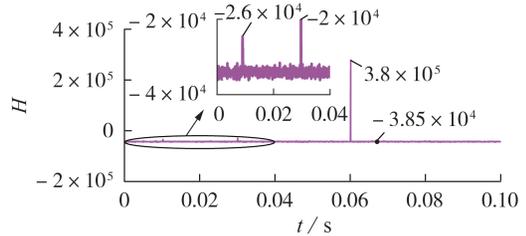
(a) 采用低电压保护时,  $i_{pv}$  和  $u_{pv}$  的波形



(b) 采用过电流保护时,  $i_{pv}$  的波形



(c) 采用本文保护方法时, 光伏支路两端电流波形



(d)  $H$  随时间变化曲线

图 5 光伏支路短路故障下, 保护速动性仿真验证结果

Fig.5 Simulative verification results of speed under short circuit fault in PV branch

击电流幅值, 提高了直流微电网的稳定性。

综上所述, 本文保护可在约 140  $\mu\text{s}$  内识别并切除故障, 且不受负载扰动影响。

#### 3.2 保护灵敏性验证

为验证本文所提方法具有更高的短路故障识别能力, 计算过电流保护、低电压保护及本文所提保护方法的保护范围。

过电流保护动作值  $I_{op}$  为:

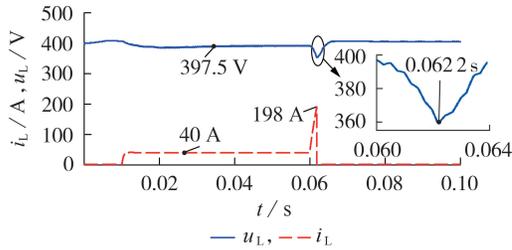
$$I_{op} = K_{rel1} \frac{U_N}{I_N} = 1.5 \times 50 = 75 \text{ (A)} \quad (18)$$

其中,  $U_N$ 、 $I_N$  分别为负荷额定电压、额定电流;  $K_{rel1}$  为可靠系数, 取为 1.5。

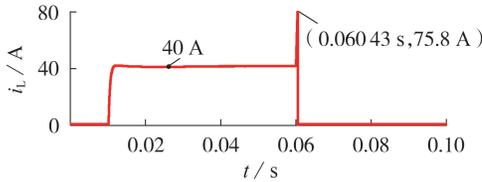
根据图 3 可得过电流保护可识别的短路电阻范围与电压、电流、电阻参数的关系为:

$$\frac{u_{min}}{R + R_f // R_L} > I_{op} \quad (19)$$

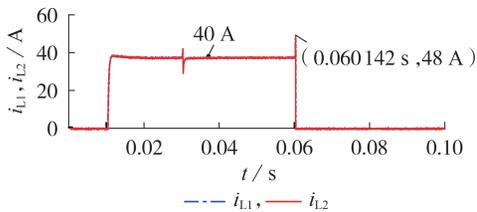
其中,  $u_{min}$  为最小允许运行电压。由式(19)可求解得



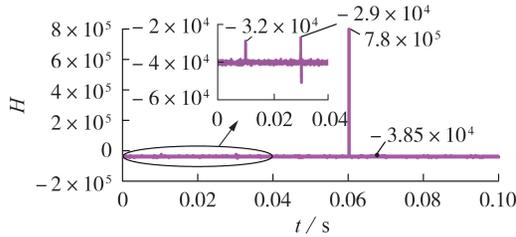
(a) 采用低电压保护时,  $i_L$  和  $u_L$  的波形



(b) 采用过电流保护时,  $i_L$  的波形



(c) 采用本文保护方法时, 负荷支路两端电流波形



(d)  $H$  随时间变化曲线

图 6 负荷支路短路故障下, 保护速动性仿真验证结果

Fig.6 Simulative verification results of rapidity under short circuit fault in load branch

表 1 3 种保护方法的性能对比

Table 1 Performance comparison among three protection methods

保护方法	故障切除时间 / $\mu\text{s}$		最大冲击电流幅值 / A	
	光伏支路	负荷支路	光伏支路	负荷支路
低电压保护	1986	2200	246	198
过电流保护	322	430	19.3	75.8
本文保护	136	142	16.4	48

到过电流保护可识别的  $R_f$  范围为:

$$R_f < \frac{R_L(0.9U_N/I_{op} - R)}{R_L - 0.9U_N/I_{op} + R} \quad (20)$$

根据式(20), 计算得到过电流保护可识别的最大短路阻抗为  $0 \sim 12.4 \Omega$ 。同理可得, 低电压保护可识别的最大短路阻抗为  $0 \sim 12 \Omega$ 。

由本文所提保护方法的整定可知:

$$dY = \frac{i}{u_{bus}} - \frac{i_L}{u_L} = \frac{R_f + R_L}{R(R_f + R_L) + R_f R_L} - \frac{1}{R_N} \quad (21)$$

依据保护判据可得:

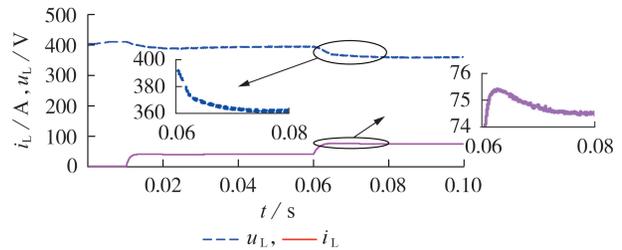
$$\frac{R_f + R_L}{R(R_f + R_L) + R_f R_L} - \frac{1}{R_N} > 0.07KY_N \quad (22)$$

可求解得到本文所提保护方法可识别的  $R_f$  范围为:

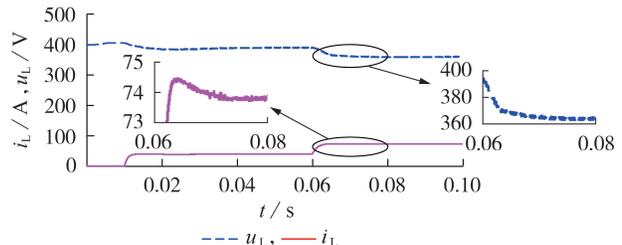
$$R_f < \frac{8(1 - 0.138R)}{0.105 - 0.138R} \quad (23)$$

由于负荷到母线的线路阻值较小,  $0.138R$  可忽略, 则本文所提保护方法可识别的短路阻抗范围为  $0 \sim 76 \Omega$ 。由上述分析计算结果可知, 本文所提保护方法具有更高的灵敏度。

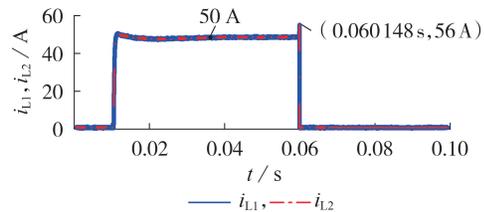
图 7 为 3 种保护方法在负荷支路发生高阻抗短路故障时的仿真结果。由图可知, 低电压保护在短路阻抗为  $12 \Omega$  时, 负荷支路电压降至  $360.5 \text{ V}$ , 大于动作值, 保护无法识别短路故障; 过电流保护在短路阻抗为  $12.4 \Omega$  时, 峰值电流为  $74.3 \text{ A}$ , 小于动作值, 保护同样不能识别故障; 本文所提保护方法在短路阻抗为  $60 \Omega$  时, 负荷支路电流为  $56 \text{ A}$ , 此时  $H \approx 3100$ ,



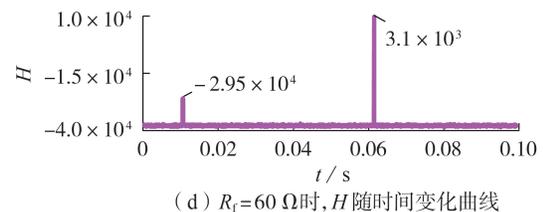
(a) 采用低电压保护时,  $i_L$ 、 $u_L$  的波形 ( $R_f = 12 \Omega$ )



(b) 采用过电流保护时,  $i_L$ 、 $u_L$  的波形 ( $R_f = 12.4 \Omega$ )



(c) 采用本文保护方法时, 负荷支路两端电流波形 ( $R_f = 60 \Omega$ )



(d)  $R_f = 60 \Omega$  时,  $H$  随时间变化曲线

图 7 负荷支路短路故障下, 保护灵敏度仿真验证结果  
Fig.7 Simulative verification results of sensitivity under short circuit fault in load branch

仍可有效识别并切除故障,所以本文保护方法具有更大的故障识别范围,在相同短路阻抗下的灵敏度更高。

### 3.3 保护选择性与可靠性

为验证本文所提保护方法的选择性和可靠性,对微源支路、负荷支路短路故障进行仿真。由于储能和风机到母线短路故障的等效电路与光伏支路故障类似,以光伏支路短路故障代表微源短路故障。在0.01 s时投入16 kW负荷,此时风机、光伏、储能分别输出10、5、1 kW,0.06 s时光伏支路和负荷支路分别发生短路故障,本文所提保护动作前、后各支路电流变化情况见图8。图中, $i_w$ 、 $i_B$ 分别为风机支路、储能支路电流。

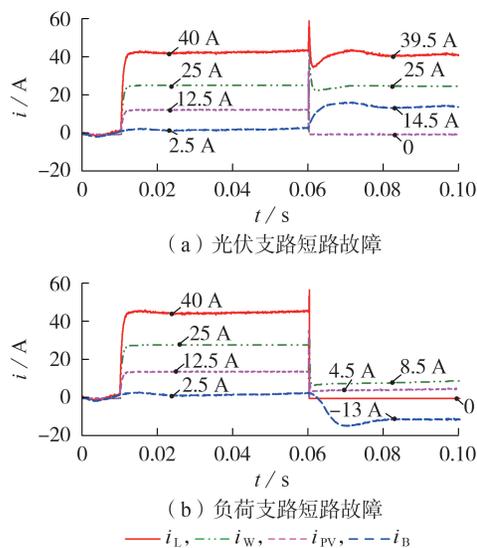


图8 光伏支路和负荷支路发生短路故障时,本文所提保护动作前、后各支路电流波形

Fig.8 Current waveforms of each branch before and after operation of proposed protection under short circuit fault in PV and load branches

从图8(a)可看出,光伏支路发生短路故障时,本文所提保护迅速切除故障,对于风机支路、储能支路和负荷支路属于区外故障,保护不动作,光伏支路被切除,而其他支路仍然正常运行;由图8(b)可知,负荷支路短路故障被切除后,其他支路不受影响。

综上所述,本文所提保护方法具有良好的选择性,减小了停电范围,提高了放射直流微电网的可靠性和能源利用率。

## 4 结论

本文针对放射直流微电网,提出直流微电网导纳导数保护判据,该方法利用故障电压与电流参量,求解支路两端导纳差值并对其求导,以导纳差值导数为故障判断量,减少了故障识别时电流或电压变化至阈值的时间,实现了故障的瞬时检测,提高了保

护速动性,同时利用故障电流突增、电压突降的特性,由支路暂态导纳代替暂态电压或电流,其变化灵敏度高于电压或电流单独变化的灵敏度,增大了故障识别范围,提高了保护灵敏度。

本文着重研究了放射直流微电网各支路短路保护的有效性,对于故障定位尚未讨论,后续将该方法在放射直流微电网群落的应用及故障定位继续开展研究。

### 参考文献:

- [1] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):1-7.  
WANG Chengshan,WANG Dan,ZHOU Yue. Frame work analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):1-7.
- [2] MENG L X, SHAFIEE Q, TRECCATE G F, et al. Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2017,5(3):928-948.
- [3] 支娜,肖曦,田培根,等. 微电网控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.  
ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):107-115.
- [4] DRAGICEVIC T, LU X, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids-part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(7):4876-4891.
- [5] 薛士敏,齐金龙,刘冲. 直流微网保护综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3404-3412,3359.  
XUE Shimin,QI Jinlong,LIU Chong. A research review of protection for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(13):3404-3412,3359.
- [6] PARK J, 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.
- [7] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):2-17.
- [8] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2287-2295.
- [9] 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.
- [10] 年珩,孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高压技术,2020,46(7):2241-2254.  
NIAN Heng,KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid[J]. High Voltage Engineering,2020,46(7):2241-2254.
- [11] KESHAVARZI D, GHANBARI T, FARJAH E. A Z-source based bidirectional DC circuit breaker with fault current limitation and interruption capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(9):6813-6822.
- [12] 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.
- [13] MOHANTY R, PRADHAN A K. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6328-6337.
- [14] 王圣辉, 范春菊, 姜山. 基于暂态电压比原理的直流配电网故障保护方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 196-205.  
WANG Shenghui, FAN Chunju, JIANG Shan. Fault protection scheme for DC distribution network based on ratio of transient voltage principle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 196-205.
- [15] CHEN D, XU L, YU J. Adaptive DC stabilizer with reduced DC fault current for active distribution power system application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1430-1439.
- [16] 王毅, 于明, 张丽荣. 环形直流微电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 Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 7-14.
- [17] BHARGAV R, BHALJA B R, GUPTEA C P. Novel fault detection and localization algorithm for low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4498-4511.
- [18] RAVYTS S, BROECK G V, HALLEMANS L, et al. Fuse-based short-circuit protection of converter controlled low-voltage DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11694-11706.
- [19] MOHANTY R, PRADHAN A K. A superimposed current based unit protection scheme for DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3917-3919.
- [20] 同向前, 余建明, 苏文成, 等. 供电技术[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2019: 21-23.

#### 作者简介:



张伟亮

张伟亮(1982—),男,河北石家庄人,讲师,博士研究生,主要研究方向为直流微电网群落能量协调控制与故障分析及保护(E-mail: zhangweiliang129@163.com);

张辉(1963—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为微型电网运行控制与新型电力储能及全电汽车分散驱动(E-mail: zhangh@xaut.edu.cn);

支娜(1976—),女,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为微电网协调控制及其稳定性(E-mail: zhina@xaut.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Protection strategy of short circuit fault in radial DC microgrid

ZHANG Weiliang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHI Na<sup>1</sup>, WANG Hanwei<sup>1</sup>, DU Mingqiao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Considering the characteristics of fault current surge and voltage drop of DC microgrid, a protection method based on derivative of admittance deference between two ends of the branch is proposed. By detecting the current and voltage of two ends of the branch, the admittance difference between two ends of the branch is calculated and its derivative is obtained. Taking the derivative of admittance difference as the fault criterion, the voltage and current parameters of the fault line are fully used to improve the sensitivity of the protection. The derivative of admittance difference is the largest at the initial phase of the fault, which can be quickly compared with the setting threshold to judge whether the fault occurs or not, thus reducing the time of waiting for the current or voltage to change to the threshold during fault detection. The proposed method is compared with the over current protection and under voltage protection. The results show that the proposed method has better performance in the aspects of speed, sensitivity and protection range.

**Key words:** DC microgrid; fault detection; admittance; sensitivity; speed