

一种适用于中压直流配电网单极故障的保护方法

高淑萍¹, 邵明星^{1†}, 宋国兵², 段必聪¹, 徐振曦¹

(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对中压直流配电网线路保护尚不完善这一问题,提出一种基于零模功率的单极故障保护方法.首先,分析直流配电网中线路发生单极故障时的故障特征,利用暂态电流分量的极性进行区内、外故障识别,利用零模功率幅值的大小进行故障线选择,利用零模电压的大小进行故障极选择.其次,对所提保护方法给出了整定判据.最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建直流配电网模型用以输出故障数据,利用 MATLAB 进行保护方法验证.结果表明,所提方法快速有效,可靠性高,耐受过渡电阻的能力较强,对数据延迟不敏感,且抗干扰能力较强.

关键词:直流配电网;电流极性;相模变换;零模功率;继电保护

中图分类号:TM77

文献标志码:A

A New Type of Protection Method Suitable for Single-pole Fault in Medium Voltage DC Distribution Network

GAO Shuping¹, SHAO Mingxing^{1†}, SONG Guobing², DUAN Bicong¹, XU Zhenxi¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of imperfect line protection in medium voltage DC distribution network, a single-pole fault protection method based on zero-mode power is proposed in this paper. Firstly, the characteristics of single-pole fault in the DC distribution network are analyzed. Fault identification is carried out by using the polarity of the transient current component, fault line selection is realized by using the magnitude of zero-mode power amplitude, and fault pole selection is implemented by using the magnitude of zero-mode voltage. Secondly, the setting criteria are given for the proposed protection method. Finally, a DC distribution network model is built in PSCAD/EMTDC to output fault data, and MATLAB is used to verify the protection method. The simulation results show that the proposed method is fast and effective, highly reliable, and has a strong ability to withstand transition resistance. It is not sensitive to data delay and has a strong anti-interference ability.

Key words: DC distribution system; current polarity; phase-mode transformation; zero-mode power; relay protection

* 收稿日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777166), National Natural Science Foundation of China(51777166); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1766209), Key Support Projects of the National Natural Science Foundation(U1766209); 国家留学基金委资助项目, China Scholarship Council

作者简介:高淑萍(1970—),女,陕西西安人,西安科技大学硕士生导师,副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: 1241085828@qq.com

近年来,电力电子器件的快速发展推动了直流配电网的快速发展,直流配电网在电能质量、稳定性、传输容量等诸多方面都较交流配电网有优势^[1-3].另外,采用直流配电网能很好解决电网对直流负荷供电时所需换流设备的问题,降低了投资成本.直流配电网还具有潮流可控性强^[4]、电网升级改造方便^[5]等诸多优点.因此,直流配电网无疑是未来配电网发展的主流方向.

继电保护作为保证配电网长期稳定运行的关键技术仍处于探索和完善阶段^[6-7].对于直流配电网保护的研究主要是借鉴交流配电网以及直流输电的相关保护原理.目前应用于直流配电网的保护技术有过流保护^[8-9]、微分欠压保护^[10-11]、距离保护^[12]、行波保护^[13]、差动保护^[14]等.直流配电网的线路可根据是否存在明显的边界分为两种情况,当直流配电网线路中存在明显的边界时,可以根据边界特征来构造保护方案.文献[15]根据线路边界的电抗器对故障信号的高频阻滞作用,区外的电流高频分量远小于区内故障的高频分量,利用暂态能量作为识别区内外故障的判据,并利用电抗器压降的正负来区分正反向的故障.文献[16]对 MMC 换流器和 VSC 换流器共存的环状直流配电网利用线模和零模网络对其故障特征进行分析,提出了一种利用线路边界电感电压初始值差异的单端量保护方法,有效解决了利用双端量带来的通讯延时的问题.

基于线路边界所设计的保护适用性较窄,当直流配电网中不存在明显的边界条件时便不再适用,

因此需要根据直流配电网的特点设计恰当的保护措施.文献[17]在分析了直流配电网发生双极故障时全电流方向特征的基础上,提出了一种利用全电流方向特征的纵联保护方法.同时为了避免单极故障时,非故障极线路由于耦合带来的影响,有学者提出了一种适用于直流线路的相模变换矩阵^[18],对直流线路进行解耦,通过对故障电流进行模量分解,并分析其特征.文献[19]提出了一种利用线模故障分量动态偏差值极值极性与大小的故障识别方法,该方法能快速识别线路故障的类型,可以作为直流配电网的一种快速保护方法.

现有文献虽然对直流配电网的故障特征进行了详细分析,并且提出了一些行之有效的保护方法,但是目前直流配电网的保护方法还比较少,仍处于探索开发阶段.

针对辐射状直流配电网的线路保护问题,本文首先对辐射状 VSC 直流配电网的故障特征进行了理论分析,在对故障分量进行模量分解的基础上,提出了一种当线路发生单极故障时利用零模功率的保护方法.最后在 PSCAD/EMTDC 下搭建了仿真模型进行保护方法的验证,验证结果表明所提的保护方法能够准确识别故障并隔离故障.

1 中压直流配电网结构

本文所搭建的辐射状中压直流配电网的拓扑结构如图 1 所示,该系统采用交流 10 kV 系统经变压

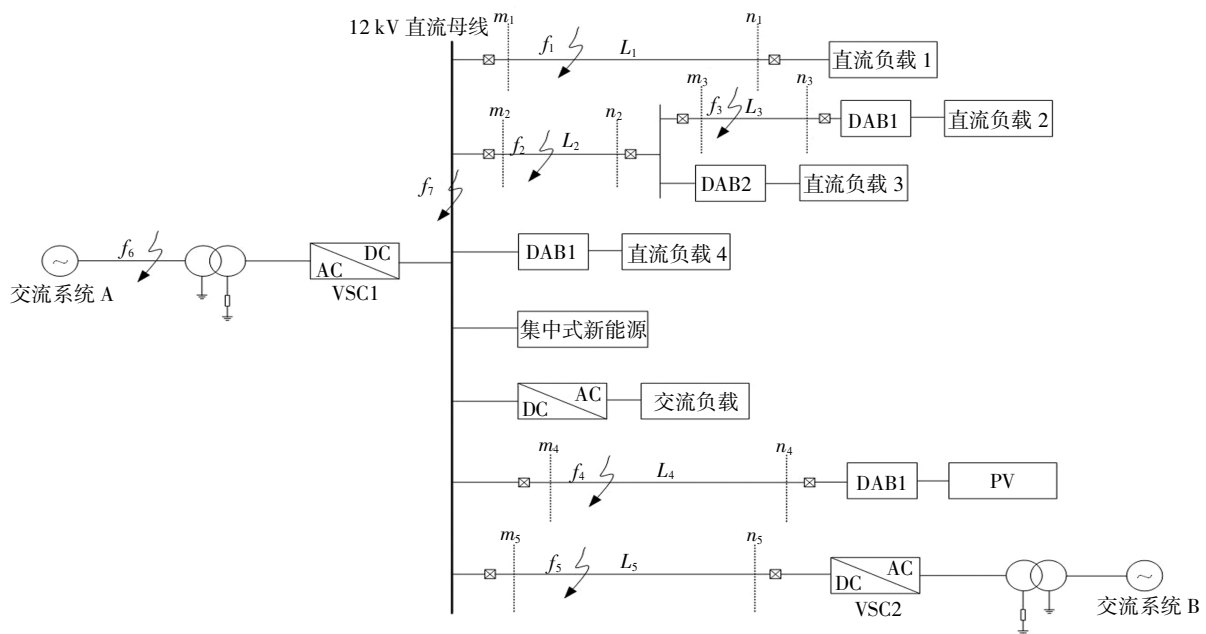


图 1 辐射状中压直流配电网

Fig.1 Radial medium voltage DC distribution grid

器进行供电,VSC1、VSC2为两电平电压源换流器,输出电压为 ± 12 kV,且均为伪双极接线方式.对于系统的接地方式,变压器采用Y/Yn且二次侧经高阻接地,直流侧采用分裂电容中点经高阻接地.集中式新能源由光伏、风电、蓄电池组成,系统中负载主要由直流和交流两种负载组成,其中直流负荷占80%,交流负荷占20%.DAB1为直流变压器,可进行能量的双向流动,对电压进行降压到800 V之后供给直流负荷2和4,并且光伏发电机组(PV)经过DAB1升压之后并入到直流配电网中,DAB2把电压降到1 500 V之后供给直流负荷3. $L_1 \sim L_5$ 为直流线路,且 L_1, L_4, L_5 的长度为10 km, L_2 和 L_3 的长度为5 km,均采用频变参数模型(Frequency Dependent (Phase) Model, FDPM)的同轴电缆,单位长度电缆的电阻值为 $0.12 \Omega/\text{km}$,电感值为 $0.17 \text{ mH}/\text{km}$, $f_1 \sim f_7$ 表示不同位置的故障.

2 中压直流配电网故障特征

由于图1所示的辐射状中压直流配电网出线复杂,负载多样化,因此在进行故障分析时需要对直流线路进行分类处理.本文按照直流线路是否含有子馈线分为两类^[20].线路1、2、4、5属于主馈线,线路3属于线路2的子馈线.

由于直流配电网线路发生单极接地故障的概率较高,且直流配电网常采用高阻接地方式以限制故障极电流,因此,当线路发生单极故障时检测难度变大,保护装置的灵敏性难以得到保证.鉴于此,本文主要对直流配电网单极故障进行研究.

2.1 不含子馈线的线路暂态电流分量极性

为了便于分析,首先规定线路正极电流的正方向为母线流向线路,负极电流的正方向为线路流向母线.对于不含有子馈线的线路分析如下,以线路1发生区内单极接地故障为例,如图1中 f_1 处.当故障发生的瞬间,直流配电网的运行状态还未发生改变,可以利用叠加定理把故障后的等效网络视为非故障状态与故障附加状态的叠加^[21],其中故障附加状态的电路图如图2所示,可计算得到线路的电流为:

$$\begin{cases} I_{fi} = \Delta I_{pmi} + \Delta I_{pni} \\ I_{Li} = I_i + I_{fi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{fi} 表示线路的故障电流; $\Delta I_{pmi}, \Delta I_{pni}$ 表示线路两侧电流的故障分量; I_i 表示线路故障前一刻的电流; i 表示第几条线路, $i = 1, 2, 3, 4, 5$; I_{Li} 表示线路的全电流;P表示线路正极;N表示线路负极.

由图2可以分析出,当线路1正极发生接地故障时,线路 m_1 侧的暂态电流分量为母线流向线路,极性为正.

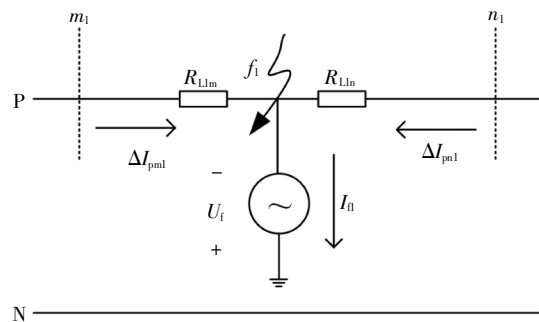


图2 线路1正极故障

Fig.2 Line 1 positive fault

当直流线路发生区外故障时,如图1所示的 f_2 处发生单极故障,其等效电路图如图3所示.因为图1中各条主馈线为并联关系,所以此处只画出了线路1的等效电路,标注了线路暂态电流分量的流向,接近故障点的 m_1 侧的暂态电流分量为线路流向母线,极性为负.

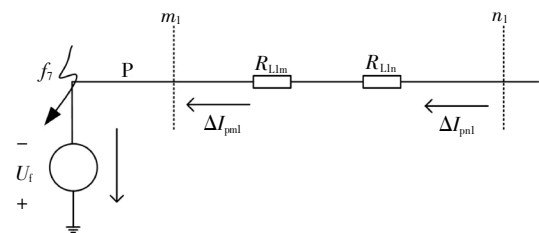


图3 区外单极故障

Fig.3 External single-pole fault

2.2 含子馈线的线路暂态电流分量极性

对于含有子馈线的线路,当主馈线正极发生故障时,如图4所示,此时线路 m_2 侧暂态电流分量的极性判别结果与上述不含子馈线的线路判别结果相同,线路 m_2 侧暂态电流分量的极性为正.子馈线正极发生故障时,如图5所示,此时线路 m_2 侧暂态电流分量的极性判别结果仍然为正;故仅依靠线路 m_2 侧暂态电流分量的极性并不能准确判别故障所存在的区段,存在误判的可能.

进一步分析可知,当主馈线正极发生故障时,线路 m_3 侧暂态电流分量的极性为负,此时主馈线和子馈线的暂态电流分量的极性相反;当子馈线正极发生故障时,线路 m_3 侧暂态电流分量的极性为正,此时主馈线和子馈线的暂态电流分量的极性相同.

基于以上特征差异,对于含有子馈线的线路可

以根据主、子馈线 m 侧暂态电流分量的极性是否相同来区分主、子馈线故障. 当判别为子馈线故障时, 为避免主馈线的误切除而导致供电质量不能保证, 此时应当准确动作子馈线的保护装置, 而主馈线的保护装置不应误动作.

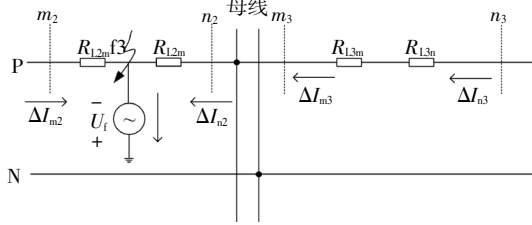


图 4 主馈线单极故障

Fig.4 Single-pole fault of main feeder

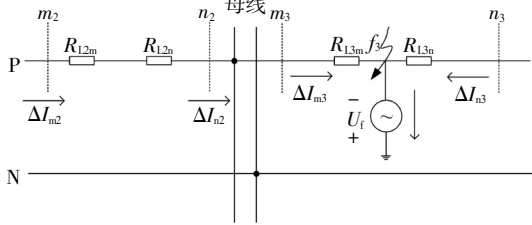


图 5 子馈线单极故障

Fig.5 Single-pole fault of sub-feeder

其余同类型的线路故障特征可按照上述方法进行分析, 不再赘述.

综上所述, 对于不含子馈线的线路可以采用线路 m 侧暂态电流分量的极性进行区内、外故障的判别; 对于含有子馈线的线路采用主馈线 m_2 侧暂态电流分量的极性和子馈线 m_3 侧暂态电流分量的极性进行辅助判别.

2.3 故障线路与非故障线路特征分析

当直流配电网中线路 1 区内发生正极接地故障时, 由于单极接地故障往往是直接接地或经一过渡电阻接地, 接地支路与接地点之后的线路和负载为并联关系, 虽然可能存在一定的过渡电阻, 但其值也远小于线路和负载的等效阻抗, 因此故障点之后的线路和负载可认为被切除, 线路因此过流. 而对于非故障线路来说, 线路电流基本不发生波动.

为了消除极间线路可能因耦合作用而存在的影响, 引入模量分解的方法对故障分量进行解耦, 文献 [18] 中介绍了一种适用于直流线路的解耦矩阵.

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_0 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_p, x_n 为直流线路正、负极电气量; x_1, x_0 分别为对应的线模和零模量; \mathbf{S} 为解耦矩阵; \mathbf{S}^{-1} 为解耦逆矩阵.

由 (2) 式可以得出线路电流、电压的零模分量为:

$$\begin{cases} i_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_p + i_n) \\ u_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} (u_p + u_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_p, i_n 分别表示线路的正、负极电流; u_p, u_n 分别表示线路的正、负极电压.

由于直流配电网中常采用小电流接地方式以限制故障电流的上升, 因此考虑采用功率量进行分析, 在此定义线路的零模功率为:

$$p_0 = u_0 i_0 \quad (4)$$

式中: p_0 表示线路的零模功率; u_0 表示线路的零模电压; i_0 表示线路的零模电流.

由于本文所研究的中压直流配电网的换流器的接线方式为伪双极接线方式, 所以当线路 1 发生正极接地故障时, 其线路零模电流和零模电压为:

$$\begin{cases} i_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_{1p} + i_{1n}) > 0 \\ u_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (u_{1p} + u_{1n}) = -\frac{\sqrt{2}}{2} u_N < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_N 表示直流配电网的额定电压 24 kV.

通过式 (4) 可计算得到线路 1 的零模功率为:

$$p_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_{1p} + i_{1n}) \times (-\frac{\sqrt{2}}{2} u_N) < 0 \quad (6)$$

线路 1 发生负极接地故障时, 其线路零模电流和零模电压为:

$$\begin{cases} i_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_{1p} + i_{1n}) < 0 \\ u_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (u_{1p} + u_{1n}) = \frac{\sqrt{2}}{2} u_N > 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过式 (4) 可计算得到线路 1 的零模功率为:

$$p_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_{1p} + i_{1n}) \times (\frac{\sqrt{2}}{2} u_N) < 0 \quad (8)$$

由于正极故障时负极电流只产生微小波动, 故 $i_{1p} + i_{1n}$ 的值可认为是线路正极的暂态电流分量, 只对暂态电流分量和零模功率的数值进行对比.

$$\frac{\left| \frac{\sqrt{2}}{2} (i_{1p} + i_{1n}) \times (-\frac{\sqrt{2}}{2} u_N) \right|}{|\Delta i_{1p}|} = \left| \frac{1}{2} u_N \right| \quad (9)$$

式中: $|\cdot|$ 表示对其中的值取模值, 即只考虑其值大小. 因此, 理论上对暂态电流分量的放大倍数可达

12倍.而非故障线路的正负极电流基本无波动,由式(4)计算得到的零模功率的值基本为0.并且当线路正极故障时通过式(4)计算得到的零模功率的值小于0,同时零模电压小于0;当线路负极发生故障时,由式(4)计算得到的零模功率的值小于0,同时零模电压大于0.

对于非故障线路而言,其线路电压、电流波动范围很小,在一定程度上可以认为是无波动的,通过式(4)计算得到零模功率.

$$p_{i0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(i_{ip} + i_{in}) \times \frac{\sqrt{2}}{2}(u_{ip} + u_{in}) \approx 0 \quad (10)$$

基于以上分析,可以考虑采用暂态电流分量的极性进行区内外故障的判定,采用各线路零模功率的幅值进行故障选线,采用零模电压的正负进行故障选极.

3 零模功率保护原理

由上述分析可知,对于不含子馈线的线路,通过线路 m 侧暂态电流分量极性的不同可以实现区内外故障的识别.对于含有子馈线的线路,通过主、子馈线 m 侧暂态电流分量极性的异同可以实现区内外故障的识别.区内故障时,可以利用各线路零模功率幅值的差异进行故障线路的选择并由零模电压的正负实现故障极的选择.

3.1 故障启动判据

由上述分析可知,当直流配电网中发生单极接地故障时,故障线路的电流发生变化,采用电流在时间域的变化量大于整定值作为本文所提保护的启动判据.即,

$$\frac{dI_i}{dt} > K \quad (11)$$

式中: $\frac{dI_i}{dt}$ 表示各线路电流在时间域的变化量; I_i 表示直流配电网正常运行时的各线路电流; K 表示判据整定值,针对本文所搭建的直流配电网模型,经过大量的仿真验证可以得出,当线路瞬时电流的幅值在相邻采样点发生0.1 kA的变化时可以认为线路中发生了故障,因此 K 值可取1 000.

为了避免保护的误启动,预设当连续三个采样点计算得到的值均满足式(11)时,保护启动.

3.2 区内外故障判据

当线路电流的变化满足式(11)时,线路保护启动.由第2节分析可知,当不含子馈线的直流线路正

极发生接地故障时,线路 m 侧的暂态电流分量的极性为正;当直流线路的负极发生接地故障时,线路 m 侧的暂态电流分量的极性为正;而当区外故障时,线路 m 侧的暂态电流分量的极性为负.所以判别区内、外故障的依据可整定为:

$$D_1 = \begin{cases} 1, \Delta I_{Pmi} > 0 \ \& \ \Delta I_{Nmi} > 0 \\ 0, \Delta I_{Pmi} < 0 \ \& \ \Delta I_{Nmi} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: ΔI_{Pmi} 、 ΔI_{Nmi} 表示线路 m 侧电流的故障分量; P 表示线路正极, N 表示线路负极; i 表示线路的编号.

式(12)表示,当暂态电流分量的极性为正时,判断为1,属于主馈线区内故障;当暂态电流分量的极性为负时,判断为0,属于主馈线区外故障.

当含有子馈线的直流线路发生单极故障时,根据第2章所介绍的仅依靠 D_1 并不能准确识别故障所处的区段,区分主、子馈线故障的方法是结合主、子馈线 m 侧暂态电流分量的极性是否相同进行辅助判别,故障判据可整定为:

$$D_2 = \begin{cases} 1, (\Delta I_{Pm2} > 0, \Delta I_{Pm3} > 0) \ \& \\ \quad (\Delta I_{Nm2} > 0, \Delta I_{Nm3} > 0); \\ 0, (\Delta I_{Pm2} > 0, \Delta I_{Pm3} < 0) \ \& \\ \quad (\Delta I_{Nm2} > 0, \Delta I_{Nm3} < 0). \end{cases} \quad (13)$$

式中: ΔI_{Pm2} 、 ΔI_{Pm3} 表示线路2和线路3正极 m 侧电流的故障分量; ΔI_{Nm2} 、 ΔI_{Nm3} 表示线路2和线路3负极 m 侧电流的故障分量.

式(13)表示,当主、子馈线暂态电流分量的极性同为正时,判断为1,属于子馈线区内故障;当主、子馈线暂态电流分量的极性相反时,判断为0,属于子馈线区外故障,此时若 D_1 的值为1,则可判定为主馈线区内故障,反之,主馈线也不存在故障.

3.3 选线和选极判据

由3.2节介绍的区内外故障判据可以实现故障区段的判定,但不能最终确定出具体是哪条线路哪一极发生了接地故障,需要进行选线和选极判据的设计.

利用2.3节所介绍的零模功率的方法进行故障线路的选择以便于实现保护的检测识别,达到保护灵敏度的要求.

当线路区内发生单极故障时,通过式(4)所计算得到的故障线路零模功率的幅值远大于0,而非故障线路零模功率的幅值接近于0.如果发生的是正极故障,故障线路的零模电压小于0,如果发生的是负极故障,故障线路的零模电压大于0.

因此,基于上述零模功率的理论可以实现故障线路的选择,并且可以根据零模电压的正负实现故

障极的选择. 具体的选线选极判据可整定如下:

$$\begin{cases} |p_{i0}| > |p_{j0}| \\ u_{i0} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $|p_{i0}|$ 表示线路零模功率的幅值; u_{i0} 表示故障线路 i 的零模电压.

式(14)表示当第 i 条线路的零模功率的幅值大于其余 j 条线路零模功率的幅值且第 i 条线路的零模电压小于 0 时, 表明线路 i 中发生了正极故障, 发出跳闸指令, 使得断路器动作于跳闸.

$$\begin{cases} |p_{i0}| > |p_{j0}| \\ u_{i0} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(15)表示当第 i 条线路的零模功率的幅值大于其

余 j 条线路的零模功率的幅值且第 i 条线路的零模电压大于 0 时, 表明线路 i 中发生了负极故障, 发出跳闸指令, 使得断路器动作于跳闸.

3.4 保护逻辑

上述章节详细阐述了每个阶段的故障判别过程, 首先根据直流配电网中配置的电流微分保护进行保护的启动, 然后对故障是否发生在区内进行判别, 当故障发生在区内时, 通过比较每条线路零模功率的幅值进行故障线路的选择, 根据故障线路零模电压值与 0 相比较的结果进行故障极的选择, 整个保护实现流程如图 6 所示.

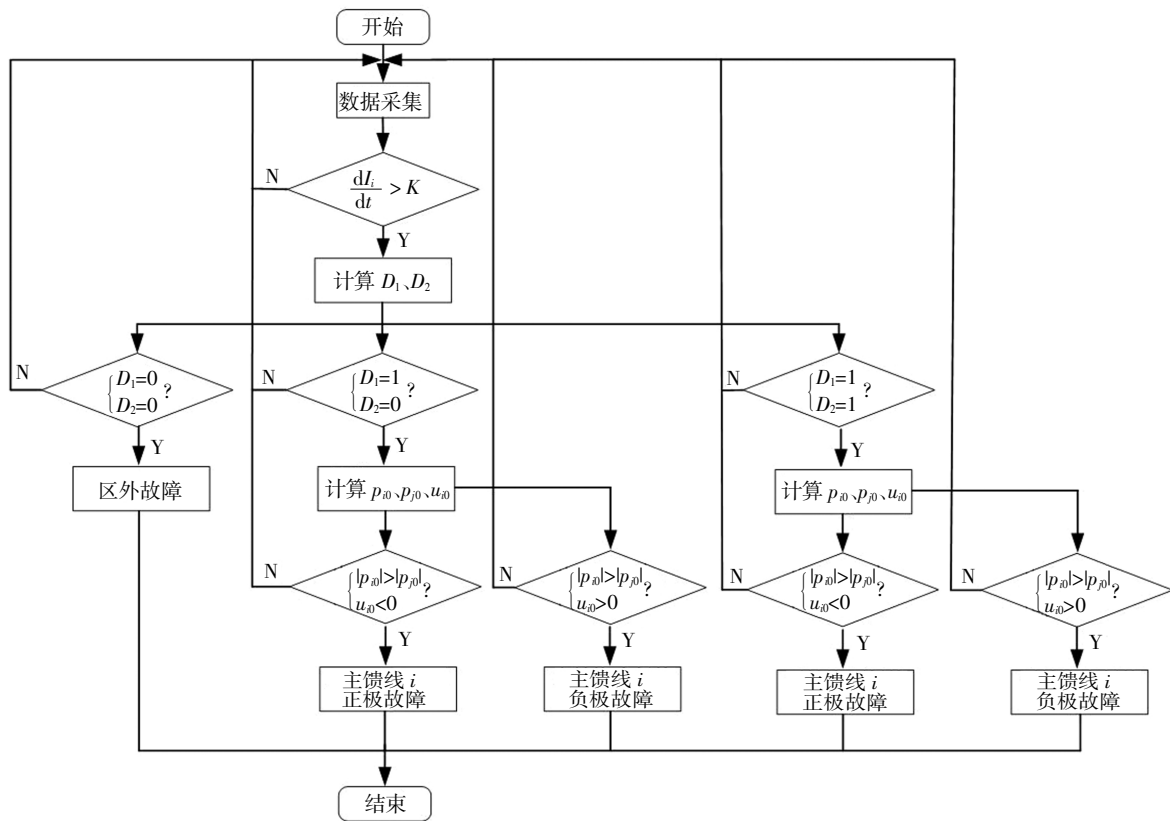


图 6 保护实现流程图

Fig.6 Protection flowchart

4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的辐射状中压直流配电网, 通过设置图 1 中不同位置的故障进行保护原理可行性的验证.

本文所提的保护方法在进行区内外故障判别时需要交互主子馈线 m 侧的信息, 目前电力系统中使用的 GPS 对时系统可将时间误差控制在 $10 \mu\text{s}$ 以

内, 完全满足数据的同步性要求, 数据采样频率设为 10 kHz , 考虑到 VSC 直流配电网中电容放电速度以及零模信号的传输速度, 数据窗口选择为 3 ms . 故障发生的时间为 0.7 s , 持续时间为 0.05 s .

4.1 不含子馈线的线路区内单极故障

对于主馈线的单极故障情况, 以线路 1 正极故障为例, 设置正极直接接地故障, 仿真结果如图 7 所示. 图 7(a)(b)所示为线路零模电流和零模电压, 图 7(c)中所示线路 1 发生故障时, 故障电流的导数在

所取的数据窗口内满足式(11)所整定的启动判据,保护装置得以启动.由图7(d)所示的区内外故障判别结果可以得出发生的是区内故障,进一步的进行故障线路的选择.图7(e)所示的各条线路的零模功率的幅值中,线路1零模功率的幅值远大于其余各线路零模功率的幅值,且线路1的零模电压的值大于0,由式(12)可判断出线路1正极发生了故障.在所选择的数据窗口内的判别结果和预设的故障类型相同,实现了故障线路的正确选择,可快速切除故障.

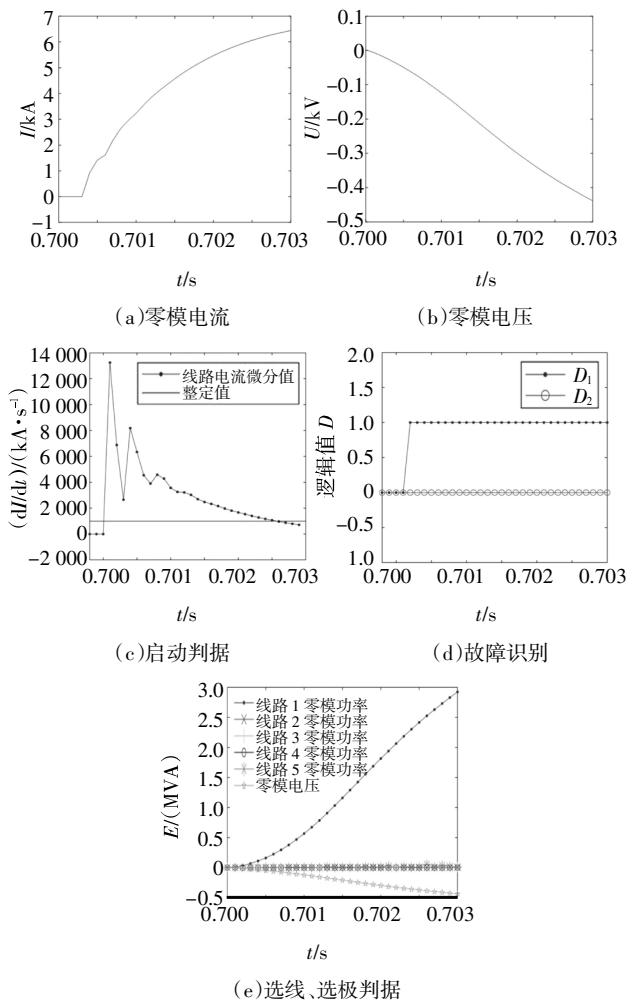


图7 线路1正极故障仿真结果
Fig.7 Line 1 positive fault simulating result

由于线路负极的故障特征与正极的故障特征类似,在一定程度上是相互对称的,限于篇幅,仿真验证结果在下文将会以表格的形式呈现.

4.2 含有子馈线的线路区内单极故障

4.2.1 含有子馈线的线路主馈线单极故障

对于含有子馈线的线路主馈线单极故障,以线路2正极故障为例,仿真结果如图8所示.图8(a)中

所示的仿真结果表明,当线路发生故障后,启动装置所检测计算到的数据迅速满足整定值,保护装置快速启动.图8(b)所示的逻辑结果表明可以迅速地把故障识别为区内故障,进而通过图8(c)的选线结果在3ms内选出故障线路.因此,整体结果表明,即使线路中含有子馈线,当线路发生单极故障时,本文所提的方法仍能够准确识别出故障线路.

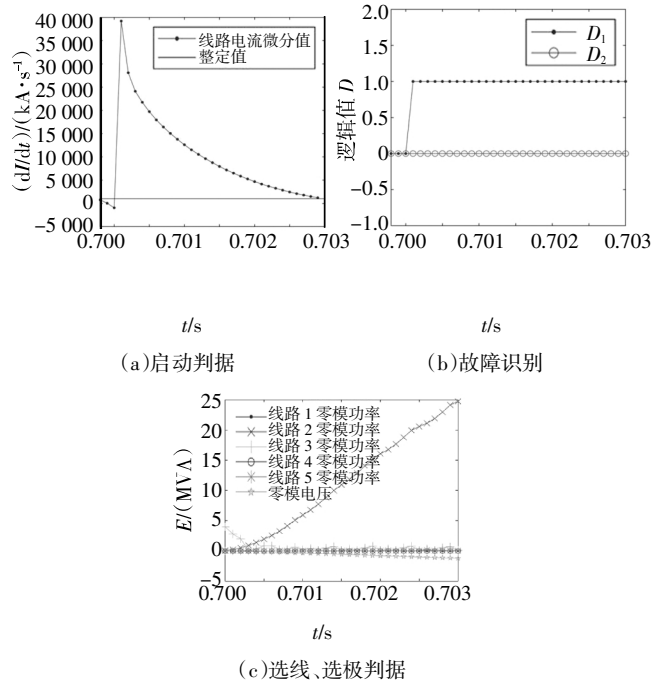


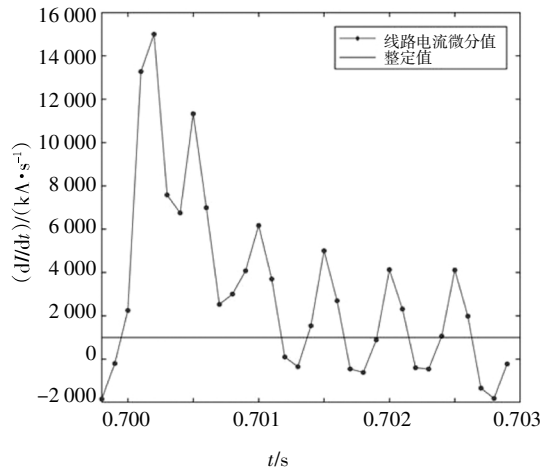
图8 线路2正极故障仿真结果
Fig.8 Line 2 positive fault simulating result

4.2.2 含有子馈线的线路子馈线单极故障

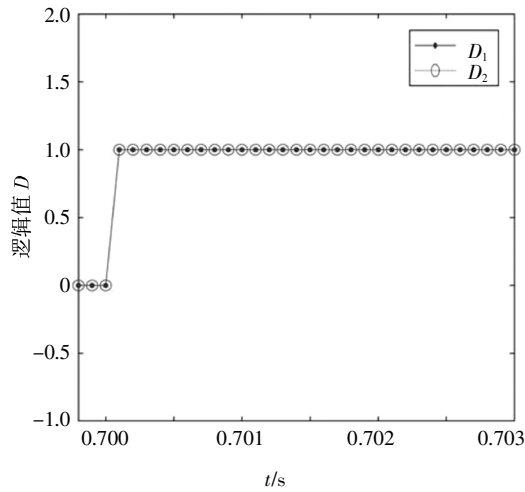
以线路3正极发生接地故障为例,验证结果如图9所示.图9(a)表示,在0.700s时电流微分值瞬间超过整定值,并且可以连续三个点确认故障发生,保护得以正确启动.图9(b)所示结果D1、D2的逻辑值均在0.700s之后变为1.0,根据式(13)可判定为子馈线区内故障.图9(c)的选线选极结果表明线路3正极发生了故障.综上所述,故障识别结果与预设故障类型相同,所提方案准确识别出了含子馈线的线路所发生的故障.

按照类似方法验证其余线路发生故障时是否准确识别故障线路,验证结果如表1所示.

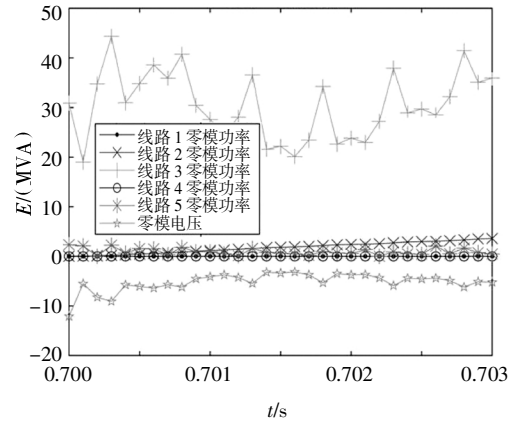
从表1可以看出,直流配电网中各条线路不论是发生正极故障还是负极故障,上述所提的保护方法均能准确识别出故障线路,可以实现故障的快速隔离.



(a)启动判据



(b)故障识别



(c)选线、选极判据

图 9 线路 3 正极故障仿真结果

Fig.9 Line 3 positive fault simulating result

4.3 区外故障

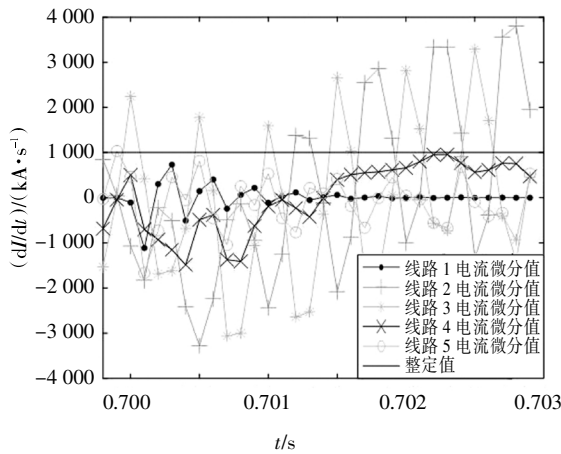
对于线路故障最难区分的是线路边界处发生金属性区外故障时的情况,保护判据在整定时需要躲过区外故障最严重的情况.为此本文主要考虑母线故障以及交流侧发生短路故障.

当直流母线正极发生金属性接地故障时(图 1 中 f_1 所示),其仿真结果如图 10 所示.图 10(a)所得结果表明,各线路电流的微分值计算结果不能连续三次满足整定值,保护不能正确启动,并且图 10(b)所示的结果也表明发生的是区外故障,因此保护不能误动作,具有良好的选择性.

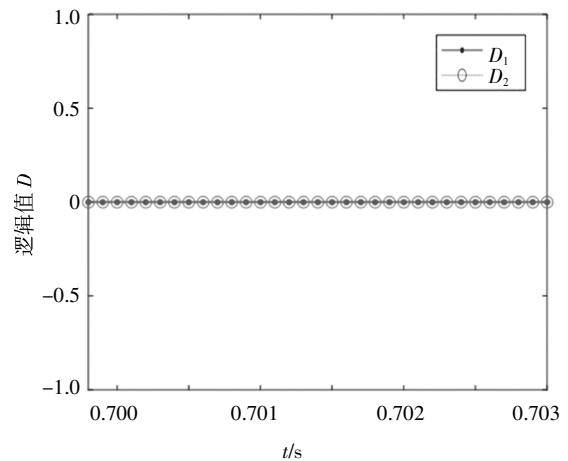
表 1 仿真识别结果

Tab.1 Simulating results

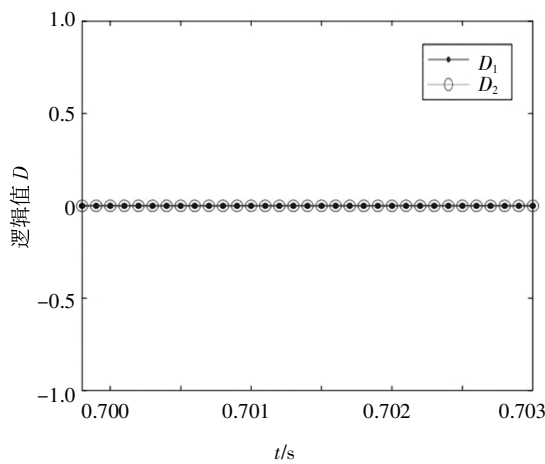
故障类型	故障线路	D 计算结果	各线路零模功率最大值/(MVA)					零模电压	识别结果
			线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
正极故障	线路 1	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	2.9	$3.0e-4$	$8.4e-3$	$2.9e-4$	0.06	$u_{10} < 0$	线路 1 正极故障
	线路 2	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$2.5e-3$	24.7	4.0	$2.5e-3$	0.15	$u_{20} < 0$	线路 2 正极故障
	线路 3	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$3.6e-4$	3.6	44.3	$3.7e-4$	2.3	$u_{30} < 0$	线路 3 正极故障
	线路 4	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$7.9e-4$	$8.3e-4$	$4.2e-4$	8.1	0.09	$u_{40} < 0$	线路 4 正极故障
	线路 5	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$9.5e-4$	$1.0e-3$	$5.0e-4$	$9.7e-4$	9.5	$u_{50} < 0$	线路 5 正极故障
负极故障	线路 1	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	0.9	$1.2e-4$	$5.9e-5$	$1.2e-4$	0.01	$u_{10} > 0$	线路 1 负极故障
	线路 2	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$2.1e-3$	19.2	4.0	$2.1e-3$	0.1	$u_{20} > 0$	线路 2 负极故障
	线路 3	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$1.8e-4$	1.5	44.3	$1.9e-4$	1.4	$u_{20} > 0$	线路 3 负极故障
	线路 4	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$5.4e-4$	$5.6e-4$	$2.8e-4$	4.9	0.04	$u_{40} > 0$	线路 4 负极故障
	线路 5	$D_1 = 1$ $D_2 = 0$	$6.3e-4$	$6.5e-4$	$3.2e-4$	$6.5e-4$	5.8	$u_{50} > 0$	线路 5 负极故障



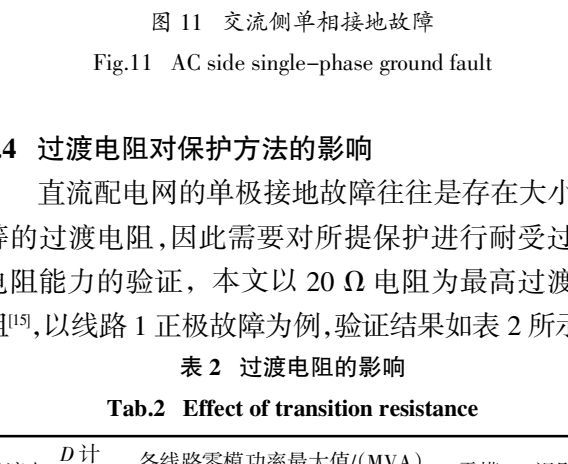
(a)启动判据



(b)故障识别



(a)启动判据

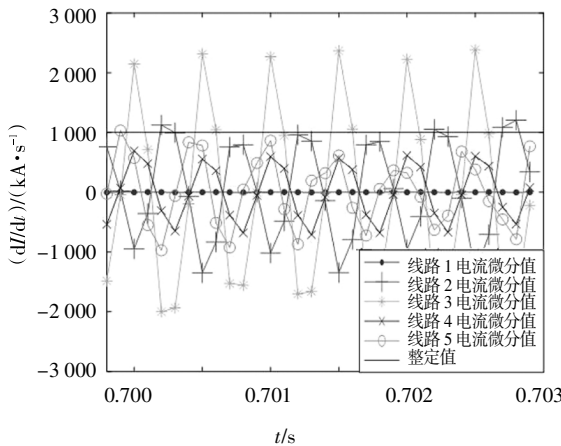


(b)故障识别

图 10 母线正极金属性故障

Fig.10 Bus positive fault

当交流侧发生单相接地故障时(图 1 中 f_6 所示),其仿真结果如图 11 所示.图 11 所得结果同样表明保护装置不能启动,判定为区外故障.



(a)启动判据

图 11 交流侧单相接地故障

Fig.11 AC side single-phase ground fault

4.4 过渡电阻对保护方法的影响

直流配电网的单极接地故障往往是存在大小不等的过渡电阻,因此需要对所提保护进行耐受过渡电阻能力的验证,本文以 20Ω 电阻为最高过渡电阻^[15],以线路 1 正极故障为例,验证结果如表 2 所示.

表 2 过渡电阻的影响

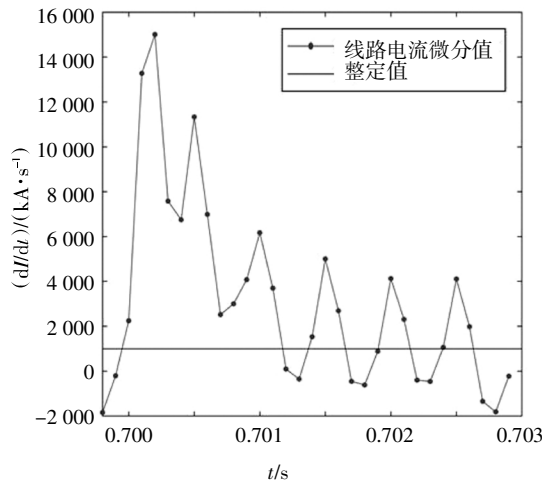
Tab.2 Effect of transition resistance

过渡电阻/ Ω	D_1 计算结果	各线路零模功率最大值/(MVA)					零模电压	识别结果
		线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
5	$D_1=1$ $D_2=0$	0.3	$8.1e-5$	$4.2e-5$	$7.9e-5$	0.03	$u_{10}<0$	线路 1 正极故障
10	$D_1=1$ $D_2=0$	0.13	$5.9e-5$	$3.0e-5$	$5.8e-5$	0.02	$u_{10}<0$	线路 1 正极故障
15	$D_1=1$ $D_2=0$	0.08	$5.3e-5$	$2.7e-5$	$5.2e-5$	0.02	$u_{10}<0$	线路 1 正极故障
20	$D_1=1$ $D_2=0$	0.06	$5.0e-5$	$2.5e-5$	$4.9e-5$	0.02	$u_{10}<0$	线路 1 正极故障

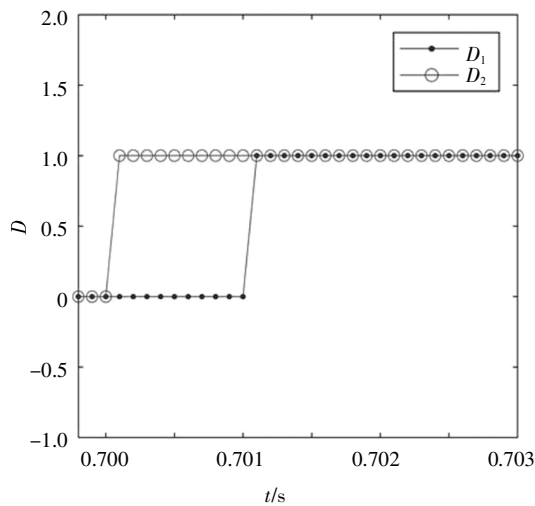
4.5 数据传输延迟对保护方法的影响

在对含有子馈线的线路进行区内外故障的判定时需要主子馈线 m 侧暂态电流的极性配合进行判定,若数据在传输过程中存在延迟可能会对判别结果产生影响.假设主子馈线 m 侧暂态电流极性判别信号送往子馈线时存在 1 ms 的延迟,以线路 3 正极故障为例,仿真结果如图 12 所示.由图 12(b), D_1 的数据信息在故障后 1 ms 传输到子馈线测量点,在 $0.700 \sim 0.701 \text{ s}$ 之间,子馈线得到的 D_1 的数据始终为

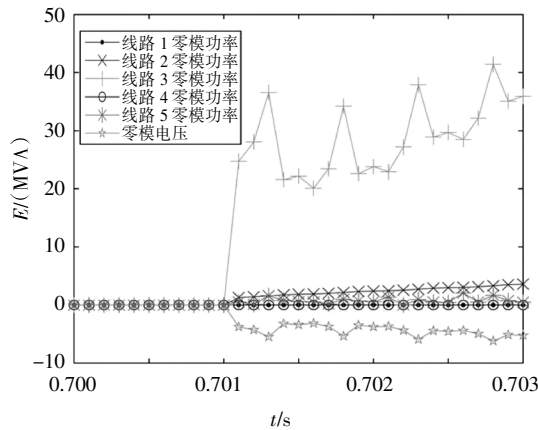
0;0.701 s 之后数据送到, D_1 瞬间变为 1, 结合 D_2 判定为子馈线区内发生故障, 启动选线、选极, 图 12(c), 在 0.701 s 之后选线、选极装置可以准确无误地选出故障线路故障极. 结果表明, 数据不同步对本文所提的保护方法没有影响.



(a)启动判据



(b)故障识别



(c)选线、选极判据

图 12 数据不同步仿真验证

Fig.12 Data asynchronous simulation verification

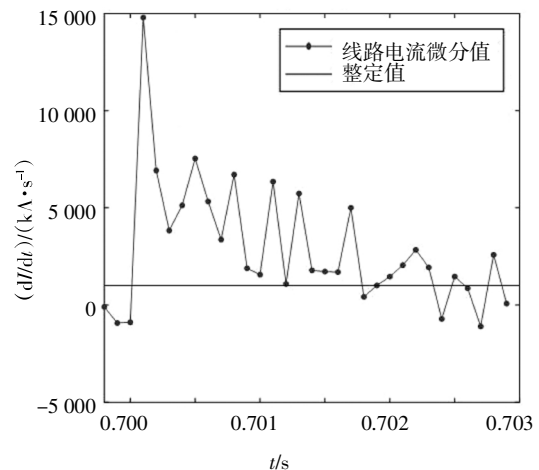
4.6 抗干扰能力

性能优越的保护方法不仅在故障点处存在过渡电阻时能准确识别出故障线路, 而且在存在干扰的情况下也应能准确识别出故障线路. 为此, 对于本文所提的保护方法验证了当区内故障时信号中存在 20 dB 的高斯白噪声的故障识别情况, 因篇幅有限, 以线路 1 正极故障进行验证说明.

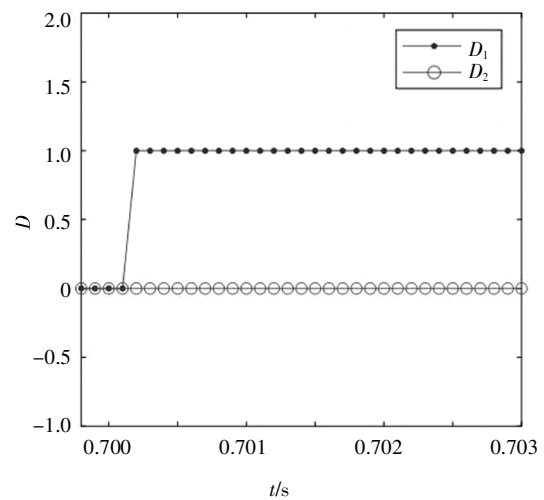
图 13 为采样信号中加入了 20 dB 白噪声时仿真验证结果, 从图 13 中可以看出, 即使采样信号中存在噪声干扰, 本文所提的保护方案仍能准确识别出故障线路, 具有较强的抗干扰能力.

4.7 与其他方法对比分析

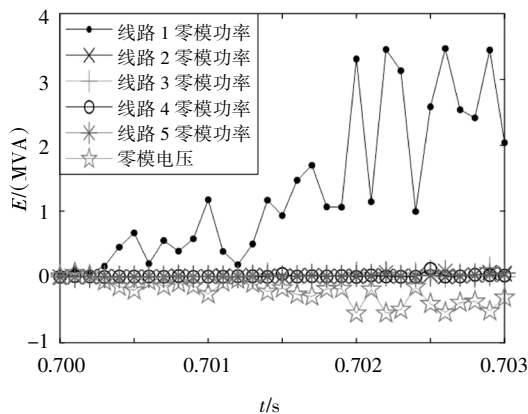
文献[9]中介绍了一种基于电流微分的保护, 该方法主要是利用电容放电电流微分值与放电时间相结合, 进行故障的判定. 本文所介绍的方法与之相对比有以下优点:



(a)启动判据



(b)故障识别



(c)选线、选极判据

图 13 噪声干扰验证结果

Fig.13 Noise interference verification results

1)保护可靠性高,本文所提的保护方法采用故障电流分量极性进行区内外故障判别,各线路零模功率幅值的差别进行故障选线,理论和仿真均表明故障线路与非故障线路零模功率幅值相差很大,便于故障判定;而且本文所提的保护方法抗过渡电阻、抗噪声干扰的能力较强,保护不易误动作.文献[9]利用电流微分作为故障识别判据,当故障点处存在较大的过渡电阻时,保护的准确性必然会受到影响.

2)数据窗口更短,本文所提的保护方法在 3 ms 内便可识别出故障线路,且从仿真数据可以看出数据窗口完全有进一步缩小的可能,有利于减小硬件电路处理数据的负担.

5 结论

本文针对辐射状直流配电网的线路保护进行了研究,分析了线路发生故障时的故障特征,由此提出了一种基于零模功率的新型保护方法,所提方法具有以下优点:

1)对于单极接地保护采用零模功率进行故障线路判别,故障判别采用的信号进行了相模变换,消除了线路极间耦合的影响.

2)数据窗为 3 ms,可以实现线路的快速保护.

3)耐受过渡电阻的能力强,可耐受常规电网中 20 Ω 的过渡电阻.

4)数据的传输延迟对所提保护方法没有影响.

5)所提保护方法抗干扰能力较强,信号中存在 20 dB 白噪声时仍能准确识别故障线路.

参考文献

- [1] DUAN J D, LI Z N, ZHOU Y, *et al.* Study on the voltage level sequence of future urban DC distribution network in China: a review [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 117: 105640.
- [2] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流入网的控制与保护综述[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1460—1475.
YUAN Z C, GUO P Q, LIU G W, *et al.* Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1460—1475. (In Chinese)
- [3] 严胜, 罗湘, 贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 205—215.
YAN S, LUO X, HE Z Y. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 205—215. (In Chinese)
- [4] SECHILARIU M, WANG B C, LOCMENT F, *et al.* DC microgrid power flow optimization by multi-layer supervision control: design and experimental validation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 1—10.
- [5] 杨卫朋, 张爱民, 李俊刚, 等. 10 kV 交流配电网升级改造不同方案的对比分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(21): 217—223.
YANG W P, ZHANG A M, LI J G, *et al.* Comparative analysis on different upgrading and reform schemes for 10 kV AC power distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(21): 217—223. (In Chinese)
- [6] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(21): 2—12.
LI B, HE J W, FENG Y D, *et al.* Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(21): 2—12. (In Chinese)
- [7] 李永刚, 韩冰. 低压直流配电系统保护研究综述[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(1): 17—23.
LI Y G, HAN B. Review on protection of LVDC distribution system research [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2020, 47(1): 17—23. (In Chinese)
- [8] BARAN M E, MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(1): 406—412.
- [9] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 42—48.
ZHOU J Y, LI F T, CHEN W W, *et al.* Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 42—48. (In Chinese)
- [10] 高本锋, 董沛毅, 刘辛晔, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2303—2311.

- GAO B F, DONG P Y, LIU X Y, *et al.* Research of HVDC transmission line differential under $-$ voltage protection characteristics and value setting [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2303—2311. (In Chinese)
- [11] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(21): 13—19.
WANG Y T, ZHANG B H, FAN X K. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC $-$ based HVDC grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40 (21): 13—19. (In Chinese)
- [12] 王喜靖, 张慧芬, 赵锡彬. 柔性直流配电网双极短路故障区段识别及测距研究 [J]. *供用电*, 2020, 37(9): 50—57.
WANG X J, ZHANG H F, ZHAO X B. Research on fault segment identification and ranging of flexible DC distribution network with bipolar short circuit [J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(9): 50—57. (In Chinese)
- [13] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 50—55.
CHEN F F, YANG Y, SONG G B, *et al.* Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid $-$ voltage DC distribution based on VSC [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 50—55. (In Chinese)
- [14] TZELEPIS D, DYSKO A, FUSIEK G, *et al.* Single-ended differential protection in MTDC networks using optical sensors [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1605—1615.
- [15] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21): 5741—5749.
LI B, HE J W, LI Y, *et al.* Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi $-$ terminal VSC $-$ based DC distribution system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5741—5749. (In Chinese)
- [16] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波, 等. 环状柔直配电网线路的单端量保护原理 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6825—6836.
DAI Z H, HUANG M, SU H B, *et al.* Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6825—6836. (In Chinese)
- [17] 李猛, 贾科, 张秋芳, 等. 基于全电流方向特征的柔性直流配电网纵联保护 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 116—122.
LI M, JIA K, ZHANG Q F, *et al.* Directional pilot protection for flexible DC distribution network based on directional characteristics of instantaneous current [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 116—122. (In Chinese)
- [18] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理 [J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(24): 57—61.
SONG G B, ZHOU D S, JIAO Z B, *et al.* A novel fault location principle for HVDC transmission line [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(24): 57—61. (In Chinese)
- [19] 蒋鹏, 周聪明, 张磊, 等. 基于电流模量分析的 MMC-MTDC 系统直流输电线路故障识别 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13(7): 51—57.
JIANG P, ZHOU C M, ZHANG L, *et al.* DC transmission line fault identification of MMC-MTDC system based on current modulus analysis [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(7): 51—57. (In Chinese)
- [20] ZENG Y, ZOU G B, SUN C J, *et al.* Identification method based on correlation analysis for SPTG fault in MMC-MVDC system [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 1662—1667.
- [21] 杨亚宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于计算电阻的高压直流输电线路纵联保护 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 84—94.
YANG Y Y, TAI N L, FAN C J, *et al.* A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on calculated resistance [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(7): 84—94. (In Chinese)