

基于电流微分初始值的 VSC 直流配电系统线路故障定位方法

高仁栋, 吴在军, 范文超, 窦晓波, 胡敏强

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:在分析基于电压源型变换器的直流配电系统线路发生单、双极故障时电压、电流时域及频域故障特性方程的基础上, 推导得到电流微分方程, 并利用不同故障类型下的正极、负极电压和电流突变量进行故障判别, 根据故障电流微分初始值推导得到故障定位方程。通过联立回路方程解决过渡电阻问题, 并利用插值算法对传统的差分算法进行改进, 解决了差分算法替代微分值存在的采样频率高、误差大的问题。仿真结果验证了所提定位方法的正确性和可行性, 表明了所提方法计算简单、定位精度高。

关键词:直流配电系统; 电压源型变换器; 故障定位; 电流微分; 故障判别; 改进差分算法

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.004

0 引言

以电压源型变换器 VSC (Voltage Source Converter) 为核心的直流系统, 如直流配电系统、直流输电系统, 采用正弦脉宽调制 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 技术, 具有自关断、输送功率高、可灵活调节有功无功、谐波较低等一系列优点^[1]。但基于两电平或三电平的 VSC 直流配电系统线路发生故障时, 直流电容迅速放电, 故障电流会在几毫秒内达到峰值, 对 VSC 内 IGBT 和并联二极管造成很大的冲击和威胁。因此, 直流配电系统保护所要求的故障切除时间极短。为了保障直流配电系统安全稳定运行, 精确快速的故障定位十分必要^[2]。

由于线路老化、损伤等原因, 相较于直流配电系统中的其他部分, 线路发生故障的概率最大。目前直流配电系统故障定位研究的相关文献较少, 主要借鉴目前故障定位技术相对较为成熟的直流输电系统。直流输电系统线路故障定位的方法主要有阻抗法、行波法与故障分析法等^[3]。阻抗法由于受接地电阻、线路类型、系统参数等因素的影响较大, 在实际工程中的应用并不理想。

行波法通过检测故障线路上暂态行波在母线与

故障点之间的传播时间进行故障定位。行波法原理简单、准确度高, 不受线路类型与故障类型的影响, 在实际工程中应用较多。但行波故障定位法需检测波头, 对波头起始时刻进行标记以实现故障定位。当过渡电阻较高时, 行波波头幅值受到限制, 行波信号微弱, 会对波头起始点的标定产生干扰, 继而影响故障定位的精度。当故障电阻继续增大时, 行波故障定位法有可能发生行波检测失败或不存在行波的情况, 导致无法进行故障定位^[4], 且无法实现自动操作。不少专家学者对行波法进行了研究改进, 文献[4]利用电压暂态量频谱信息对直流输电线路进行单端故障定位, 该方法利用行波固有频率主成分进行测距, 不存在行波波头识别困难的问题, 但该方法受线路终端条件与边界条件的限制; 文献[5]利用故障行波传播过程中频谱包含的频率值与行波传播路径的关系实现输电线路的故障定位, 无需识别行波波头及检测行波到达时刻, 但需安装固有频率测量单元, 且受限于固有频率测量单元的优化问题; 文献[6]提出了一种利用行波电压分布特征的故障定位方法, 利用网络中电压行波中的故障分量反射特点实现直流输电线路单端故障定位, 该方法不受过渡电阻的影响, 但对设备采样率有较高要求。

故障分析法则是根据测量得到的电压、电流以及系统参数, 通过分析计算求得故障定位值。故障分析法主要借助故障录波器的录波数据进行分析计算, 从而达到测距定位的目的。故障分析法简单易行, 目前较为常见的故障分析法为利用线路分布参数时域模型进行故障定位。文献[7]提出利用线路分布参数模型的直流线路单端故障定位方法, 利用单端电压、电流量计算沿线电压与电流分布, 并根据

收稿日期: 2017-02-15; 修回日期: 2017-11-09

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (XNY-005); 国网浙江省电力公司科技项目 (5211SX160009); 国家电网公司科技项目 (PD71-16-010)

Project supported by the Talents in Six Kinds of Profession of Jiangsu Province of China (XNY-005), the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation (5211SX160009) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (PD71-16-010)

故障点的边界条件实现故障定位。文献[8]采用贝瑞隆线路模型,利用双端电压、电流量计算沿线电压与电流分布,实现直流输电线路双端故障测距。故障分析法可直接借助故障录波器的录波数据实现故障定位,对设备采样率要求低,可靠性较高,但该方法建立在精确的线路参数模型基础上,当线路参数模型不精确或频变特性发生改变时,均会影响故障定位的精度。因此,故障分析法虽较为稳定,但精度没有行波法高。

本文在分析两电平 VSC 结构的直流配电系统故障特性的基础上,提出一种利用故障时电流微分初始值进行线路故障定位的方法。该方法对采样频率要求不高且具有较高的定位精度。

1 VSC 直流配电系统故障分析

1.1 双极短路故障分析

采用由 IGBT 组成的两电平 VSC 直流配电系统的故障类型主要分为双极短路故障与单极接地故障,其中双极短路故障对系统造成的危害最大^[9]。VSC 整流器直流侧发生双极短路故障时的等效电路图如图 1 所示。VSC 直流配电系统采用的是典型的三相两电平拓扑结构。本文方法基于换流器直流侧电容的放电电压、电流录波数据,其中直流侧采用大电容接地滤波,其电容值远大于线路的分布电容,故可忽略等值模型中的对地电容^[10]。同时,由于直流配电网线路长度较短,通常为 5~10 km 以内,因此本文采用 π 型等值线路模型, R 和 L 分别为直流侧出口处到正、负极线路上故障点的总电阻和总电感, $R=2R_{eq}+R_f$, $L=2L_{eq}$, $C=C_{eq}/2$, R_f 为过渡电阻,双极短路故障过渡电阻较小,可近似认为 $R_f \approx 0$ 。

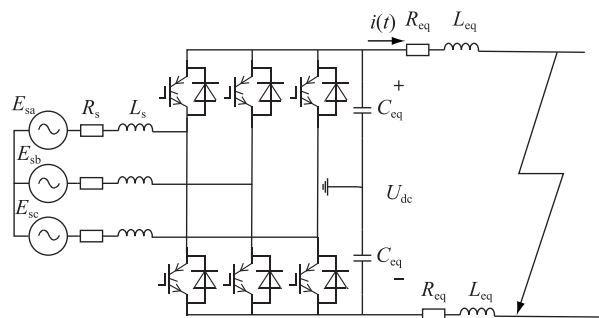


图 1 双极短路故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of pole-to-pole short circuit fault

当直流配电系统线路上发生两极短路故障时,流过 IGBT 上的电流急剧上升,IGBT 会启动自保护而立即关断。因此,为了分析方便,假设 IGBT 发生

故障瞬间,在自身保护作用下在极短的时间内立即锁定^[11]。双极短路故障的第一个阶段为直流侧电容放电过程,由于发生双极短路故障时,过渡电阻较小,一般满足 $R < 2\sqrt{L/C}$,因此会形成 RLC 振荡电路。在双极短路故障的第一个阶段,直流侧电压 U_{dc} 大于交流侧线电压,此时,交流侧提供的短路电流只是限流电抗器的续流,故障电流将以直流侧电容向短路点放电为主^[12-14],双极短路故障第一个阶段等效图如图 2 所示。双极短路故障的第二、三个阶段为二极管续流阶段以及交流侧电流馈入的不控整流阶段^[15],由于本文故障定位方法只涉及第一个阶段,故不再一一分析。

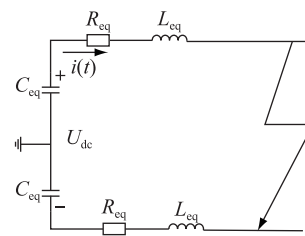


图 2 双极短路故障第一阶段等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of first stage for pole-to-pole short circuit fault

由图 2 可得故障电流方程为:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{i_L(0)\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (1)$$

其中, $u_c(0)$ 与 $i_L(0)$ 分别为故障前的直流电压、电流值; $\delta = R/(2L)$; $\omega_0 = \sqrt{1/(LC)}$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $\beta = \arctan(\omega/\delta)$ 。双极短路故障电容放电阶段仿真曲线如图 3 所示。

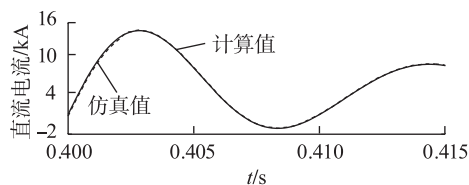


图 3 双极短路故障仿真曲线

Fig.3 Simulative curve of pole-to-pole short circuit fault

电流微分方程为:

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{u_c(0)\omega_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{i_L(0)\omega_0^2}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - 2\beta) \quad (2)$$

在 PSCAD 平台中搭建仿真模型,由双极短路故障仿真结果可以看出,电容放电阶段 $i(t)$ 为凸函数,则有:

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} < 0 \quad (3)$$

设故障时刻为初始 $t=0^+$ 时刻,由此可知电流微分方程 $di(t)/dt$ 在电容放电阶段呈单调递减,即在 $t=0^+$ 时刻取得最大值。在 $t=0^+$ 时刻,电流微分值为:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)\omega_0}{\omega L} \sin \beta - \frac{i_L(0)\omega_0^2}{\omega} \sin(2\beta) \quad (4)$$

$$\sin \beta = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (5)$$

$$\sin(2\beta) = 2\sin \beta \cos \beta = 2 \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{2\omega\delta}{\omega_0^2} \quad (6)$$

则有:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)}{L} - i_L(0) \frac{R}{L} \quad (7)$$

1.2 单极接地故障分析

VSC 整流器直流侧线路上发生单极接地故障时,也会经历电容快速放电的过程。单极接地故障示意图如图4所示,发生单极接地故障时,由于直流侧电容中性点与地等电位,直流侧电容与故障线路和过渡电阻形成二阶 RLC 振荡回路,实现电容的快速放电,振荡形式与故障距离以及过渡电阻的大小有关。一般而言,发生单极接地故障时,低/高阻抗均有可能出现^[16]。当 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时,为欠阻尼放电过程,电容放电回路将出现振荡过程,但振荡幅值会越来越小;当 $R > 2\sqrt{L/C}$ 时,为过阻尼放电过程,故障回路暂态能量将迅速下降,直至为0。

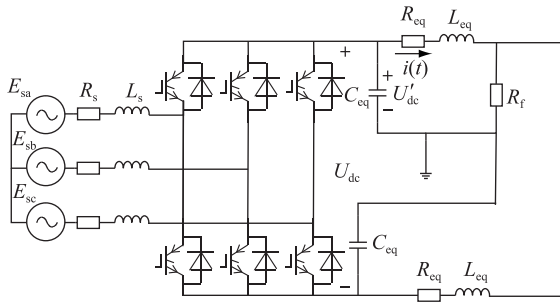


图4 单极接地故障示意图

Fig.4 Schematic diagram of pole-to-ground fault

图5为单极接地故障第一阶段等效图,当 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时,单极接地故障第一阶段与双极短路故障相似,仍是RLC放电过程,此时故障极的电压、电流时域方程 $U'_d, i(t)$ 仍可以用双极短路故障的电流方程式(1)求得。此时 $R=R_{eq}+R_f, L=L_{eq}, C=C_{eq}$ 。因此,电流微分的初始值仍可用式(7)表示。

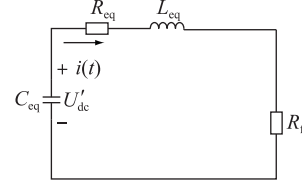


图5 单极接地故障第一阶段等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of first stage for pole-to-ground fault

当 $R > 2\sqrt{L/C}$ 时,故障回路的频域模型如式(8)所示。

$$i(s) = \frac{u_c(0)/L + i_L(0)s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

时域表达式为:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{L(p_2 - p_1)} (e^{-p_1 t} - e^{-p_2 t}) + \frac{i_L(0)}{p_2 - p_1} (-p_1 e^{-p_1 t} + p_2 e^{-p_2 t}) \quad (9)$$

$$U'_d = -\frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{u_c(0)}{p_1 - p_2} (p_2 e^{-p_1 t} + p_1 e^{-p_2 t}) + \frac{i_L(0)}{C(p_1 - p_2)} (e^{-p_1 t} - e^{-p_2 t}) \quad (10)$$

$$p_1, p_2 = \alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

电流微分方程为:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u_c(0)}{L(p_2 - p_1)} (-p_1 e^{-p_1 t} + p_2 e^{-p_2 t}) + \frac{i_L(0)}{p_2 - p_1} (p_1^2 e^{-p_1 t} - p_2^2 e^{-p_2 t}) \quad (11)$$

类似于双极短路故障,发生单极接地故障时故障极的电流微分方程 $di(t)/dt$ 在电容放电阶段呈单调递减,在 $t=0^+$ 时刻取得最大值。在 $t=0^+$ 时刻,电流微分的值为:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)}{L} - i_L(0)(p_1 + p_2) \quad (12)$$

代入 p_1, p_2 的值,可得:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)}{L} - i_L(0) \frac{R}{L} \quad (13)$$

可见,式(13)与式(7)是一致的。由上述分析可知,无论是双极短路故障还是单极接地故障,其电流微分的初始值均可以用式(7)表示。

基于上述分析,本文基于故障时电流微分初始值提出一种新型的适用于VSC直流配电系统线路上发生单双极故障的定位方法。

2 故障定位方法分析

2.1 双极短路故障的故障定位

由第1节分析可知,在 $t=0^+$ 时刻, $di(t)/dt$ 取得极大值,在工程实际中,通常利用差分值替代微分值,则有:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)}{L} - i_L(0) \frac{R}{L} = \frac{i(\Delta t + t_0) - i(t_0)}{\Delta t} = \max \left\{ \frac{i(\Delta t + t) - i(t)}{\Delta t} \right\} = k \quad (14)$$

对于 R 与 L ,有:

$$\begin{cases} R = R_u x + R_f \\ L = L_u x \end{cases} \quad (15)$$

其中, R_u 和 L_u 分别为单位电缆长度的电阻与电感参数; x 为故障定位值。双极短路故障的过渡电阻较小,可近似认为 $R_f \approx 0$ 。

由式(7)与式(15)可得发生双极短路故障时的故障定位值为:

$$x = \frac{u_c(0)}{kL_u + R_u i_L(0)} \quad (16)$$

2.2 单极接地故障的故障定位

对于单极接地故障而言,由于过渡电阻的存在,过渡电阻已经不能近似看成 $R_f \approx 0$,则由式(13)可得单极接地故障的故障定位值为:

$$x = \frac{u_c(0) - R_f i_L(0)}{kL_u + R_u i_L(0)} \quad (17)$$

发生单极接地故障时,过渡电阻呈现低/高阻抗均有可能出现,使得由式(17)所得故障定位值的精度受到了很大的限制。

2.3 过渡电阻的处理办法

由图5可得发生单相接地故障时故障极回路的基尔霍夫电压方程为:

$$xR_u i + R_f i + xL_u \frac{di}{dt} = U'_{dc} \quad (18)$$

联立式(17)与式(18),可得故障定位值为:

$$x = \frac{i u_c(0) + i_L(0) U'_{dc}}{\left(ik - \frac{di}{dt} i_L(0) \right) L_u} \quad (19)$$

由式(19)得到的故障定位值通过联立电流微分初始值以及回路方程,消除了过渡电阻对故障定位方程的影响。

2.4 故障类型与故障极判定

由上述分析可知,对于不同的故障类型以及故障极,其故障定位方程也不同,因此,需要在故障发生后进行故障类型与故障极的判定。

设 $\Delta U = U - U_0$ 、 $\Delta I = I - I_0$,则可以利用正负极在不同故障类型下的突变量进行故障判别。

发生双极短路故障时,正极有 $\Delta U_1 < 0$ 、 $\Delta I_1 > 0$,负极有 $\Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_2 < 0$,则有 $\Delta U_1 / \Delta U_2 < 0$ 、 $\Delta I_1 / \Delta I_2 < 0$ 。发生单极接地故障时,正极接地故障下,正极有 $\Delta U_1 < 0$ 、 $\Delta I_1 > 0$,负极有 $\Delta U_2 < 0$ 、 $\Delta I_2 > 0$,则有 $\Delta U_1 / \Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_1 / \Delta I_2 > 0$;负极接地故障下,正极有 $\Delta U_1 > 0$ 、 $\Delta I_1 < 0$,负极有 $\Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_2 < 0$,则有 $\Delta U_1 / \Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_1 / \Delta I_2 > 0$ 。

故障类型判定算法流程图如图6所示。提取故障前后10 ms内的录波图,对比不同故障类型下正负极的电压、电流突变量方向。判断 $\Delta U_1 / \Delta U_2$ 方向,如果 $\Delta U_1 / \Delta U_2 < 0$,则可以判定为双极短路故障;如果 $\Delta U_1 / \Delta U_2 > 0$,则可以判定为单极接地故障,且可以通过判断 ΔI_1 、 ΔI_2 的方向实现正、负极故障的选择。

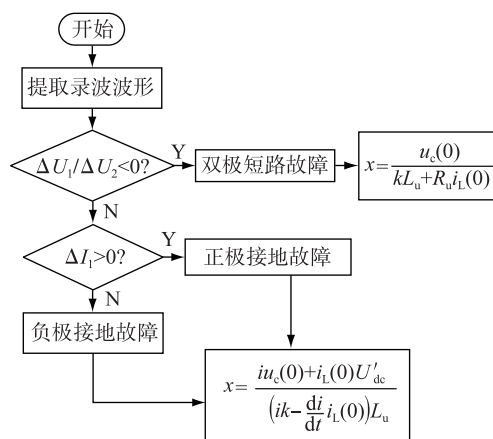


图6 算法流程图

Fig.6 Flowchart of algorithm

3 故障定位方法仿真验证

3.1 双极短路故障定位方法验证

在PSCAD/EMTDC环境中搭建如图1所示的仿真模型。其中,直流配电系统电压等级为10 kV,单位电阻参数为 $R_u = 0.014 \Omega/\text{km}$,单位电感参数为 $L_u = 0.56 \text{ mH}/\text{km}$,直流对地单位电容参数为 $C_u = 10 \text{ pF}/\text{km}$,系统等效电容为 $C = C_{eq}/2 = 6660/2 = 3330 \mu\text{F}$,线路长度为10 km。采样频率为10 kHz,提取故障前后10 ms的录波图,并将录波数据导入MATLAB进行计算。

表1为双极短路故障下的故障定位距离与实际值的相对误差。可以看出,双极短路故障模式下,利用式(16)所示故障定位方程计算得到的故障定位距离与实际值的相对误差基本都在1%以内,具有很高的精度,证明了式(16)所示故障定位方法的可行性。

表1 双极短路故障定位距离与实际值的相对误差

Table 1 Relative error of calculative distance and actual distance of pole-to-pole short circuit fault location

实际距离/m	定位距离/m	相对误差/%	实际距离/m	定位距离/m	相对误差/%
500	501.39	0.278	5 000	5 009.98	0.200
1 000	1 002.30	0.230	10 000	10 019.40	0.194
3 000	3 006.20	0.207			

3.2 单极接地故障定位方法验证

单极接地故障模型的线路参数同双极短路故障模型一致,直流配电网故障电阻较小,一般为十几欧姆,因此以故障过渡电阻为 $0.1\ \Omega$ 、 $1\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 与故障距离为 $0.5\ \text{km}$ 、 $1\ \text{km}$ 、 $3\ \text{km}$ 、 $5\ \text{km}$ 、 $10\ \text{km}$ 为算例,验证单极接地故障定位模型的正确性以及可行性。假设IGBT在故障发生时立刻闭锁,采样频率为 $10\ \text{kHz}$ 。

表2为由式(19)得到的故障距离定位值与实际值的相对误差(表头中数据为故障过渡电阻)。由表2可知,在采样频率为 $10\ \text{kHz}$ 下,当过渡电阻较小时,改进后故障定位值的相对误差绝大部分都在2%以内,精度较高,但当过渡电阻增大时,改进后故障定位值已不再适用,因此,有必要对故障定位值计算式(19)进行分析以提高长距离以及高过渡电阻下的定位精度。

表2 单极接地故障定位值与实际值的相对误差

Table 2 Relative error of calculative distance and actual distance of pole-to-ground fault location

故障实际距离/km	相对误差/%			
	$0.1\ \Omega$	$1\ \Omega$	$5\ \Omega$	$20\ \Omega$
0.5	1.81	18.27	109.33	292.21
1	0.88	8.86	48.99	107.24
3	0.11	2.69	14.53	19.03
5	-0.16	1.35	8.05	9.30
10	-0.65	0.04	2.80	4.50

3.3 采样频率对定位精度的影响

由式(14)可知,电流微分值是取故障后某个时间段内最大差分值得代替 $t=0^+$ 时刻的电流微分值,因此电流微分值 k 的精度主要取决于差分值的替代误差。故障定位方程误差如式(20)所示。

$$|e(x)| \approx \left| -\frac{i u_c(0) + i_L(0) U'_{dc}}{\left(ik - \frac{di}{dt} i_L(0)\right)^2 L_u} \left(i e(k) - i_L(0) e\left(\frac{di}{dt}\right) \right) \right| \leq \frac{i u_c(0) + i_L(0) U'_{dc}}{\left(ik - \frac{di}{dt} i_L(0)\right)^2 L_u} \left(|i e(k)| + i_L(0) \left| e\left(\frac{di}{dt}\right) \right| \right) \quad (20)$$

其中, $e(x)$ 为故障定位值误差; $e(di/dt)$ 与 $e(k)$ 分别为差分值替代微分值与微分初始值的误差。由式(20)可以看出故障定位值误差与 $e(k)$ 正相关。

差分值替代微分值的误差为:

$$e(di/dt) = -\frac{\Delta t}{2} i''(t) = -\frac{1}{2f} i''(t) \quad (21)$$

其中, $i''(t)$ 为故障电流方程二阶微分方程; f 为采样频率。由式(21)可知,差分值替代微分值误差主要受采样频率的影响。随着采样频率 f 的增加,差分值替代微分值的误差逐渐降低,故障测距值误差 $|e(x)|$ 也逐渐减小。

表3为在不同的采样频率、低过渡电阻条件下的故障定位值的相对误差,表4为在不同的采样频率、高过渡电阻条件下的故障定位值的相对误差(表中数据为采样频率)。

表3 不同采样频率下、 $R_f=0.1\ \Omega$ 时故障定位值相对误差Table 3 Relative error of fault location distance in different sample frequency when $R_f=0.1\ \Omega$

故障实际距离/km	相对误差/%			
	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz
0.5	1.81	0.87	0.32	0.14
1	0.88	0.39	0.11	0.01
3	0.11	-0.06	-0.17	-0.20
5	-0.16	-0.28	-0.35	-0.37
10	-0.65	-0.72	-0.76	-0.78

表4 不同采样频率下、 $R_f=20\ \Omega$ 时故障定位值相对误差Table 4 Relative error of fault location distance in different sample frequency when $R_f=20\ \Omega$

故障实际距离/km	相对误差/%			
	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz
0.5	292.21	136.70	84.50	24.50
1	107.24	50.24	38.59	8.59
3	19.03	11.95	12.27	2.27
5	9.30	6.87	7.56	1.56
10	4.50	3.92	4.43	1.43

由表3、4的结果可以看出,过渡电阻较小时,故障定位值具有很高精度,误差维持在1%以内;但当在高过渡电阻下,采样频率对故障定位精度影响较大。这是由于过渡电阻增加时,电流微分变化速率较小,低采样频率下电流的差分值与实际微分值的误差较大,导致故障定位值的误差也较大。因此有必要对传统的差分算法进行改进以提高在高过渡电阻下式(19)的定位精度。

3.4 低采样频率下故障定位方法改进方案

设已知3个点的采样值 $(x_0, f(x_0))$ 、 $(x_1,$

$f(x_1)$)、 $(x_2, f(x_2))$, 做二次插值:

$$p_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}f(x_2) \quad (22)$$

对 $p_2(x)$ 求导得:

$$p'_2(x) = \frac{2x-x_1-x_2}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}f(x_0) + \frac{2x-x_0-x_2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}f(x_1) + \frac{2x-x_0-x_1}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}f(x_2) \quad (23)$$

若节点是等距的, 则有 $x_2-x_1=x_1-x_0=h$, 可得:

$$p'_2(x_0) = \frac{1}{2h}(-3f(x_0) + 4f(x_1) - f(x_2)) \quad (24)$$

则由式(24)代替式(14)计算微分值, 可得:

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{u_c(0)}{L} - i_L(0) \frac{R}{L} = \frac{-3i(t_0) + 4i(\Delta t + t_0) - i(t_0 + 2\Delta t)}{2\Delta t} = \max \left\{ \frac{-3i(t) + 4i(\Delta t + t) - i(t + 2\Delta t)}{2\Delta t} \right\} = k \quad (25)$$

表 5 为在过渡电阻为 $R_f = 20 \Omega$ 时利用改进差分算法得到的故障定位值相对误差(表头中数据为采样频率)。可以看出, 使用改进差分替代算法后, 即使在较高过渡电阻条件下, 故障定位仍有较高精度, 且较原有算法定位精度有大幅提高。但采样频率为 10 kHz 时, 改进算法对于故障距离 0.5 km 与 1 km 的定位精度仍有待提高, 对于中长距离的定位误差则在可接受范围内; 采样频率继续上升时, 故障

表 5 基于改进差分算法故障定位值的

相对误差 ($R_f = 20 \Omega$)

Table 5 Relative error of fault location distance based on improved difference algorithm ($R_f = 20 \Omega$)

故障实际距离/km	相对误差/%			
	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz
0.5	34.25	5.87	3.20	1.92
1	10.94	3.29	1.74	1.05
3	1.80	0.68	1.16	0.71
5	1.03	0.60	0.60	0.41
10	1.01	0.52	0.40	0.36

定位精度虽有所提高, 但上升幅度不大, 且高采样频率对于硬件的要求比较高。对于故障定位精度要求不是很高($<5\%$)的条件下, 建议选择的采样频率为 10~20 kHz。

4 结论

本文提出的利用电流微分初始值的直流配电系统线路故障定位方法具有以下特点: 可利用不同故障类型下电压、电流的突变量实现故障类型与故障极的判别; 具有一定的耐受过渡电阻能力, 但定位精度随过渡电阻的增加而下降; 该方法利用插值算法对传统的差分法代替微分进行改进, 所需采样频率大幅降低, 采样频率在 10~20 kHz 时, 即可满足算法的精度要求。

所提故障定位方法对于具有较高过渡电阻与中长距离的 VSC 直流系统的故障定位精度较高, 可用于直流配电网系统, 船舶直流配电系统以及输送距离较短且功率具有分散性、小型性、随机性的直流输电系统(如分布式能源并网)。随着直流配电网的普及以及应用容量的增加, 模块化多电平变换器(MMC)势必将会更多地应用于直流配电网, 因此, 下一步的研究方向为适用于 MMC 型的直流配电网故障定位方法研究。

参考文献:

- [1] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [2] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [3] 和敬涵, 张明, 罗国敏, 等. 一种利用故障暂态过程的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 985-992.
HE Jinghan, ZHANG Ming, LUO Guomin, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on fault transient process[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 985-992.
- [4] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [5] 林圣, 武晓, 何正友, 等. 基于行波固有频率的电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 270-275.
LIN Sheng, WU Xiao, HE Zhengyou, et al. A power system fault location method based on natural frequencies of traveling waves[J].

- Power System Technology, 2013, 37(1): 270-275.
- [6] 宋国兵,李德坤,靳东晖,等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 83-88.
- SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.
- [7] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [8] 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 Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zailin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [9] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
- LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [10] 胡竞竞. 直流配电系统故障分析与保护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- HU Jingjing. Fault analysis and protection technology of DC distribution system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [11] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S, 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.
- [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 Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 7-14.
- [13] 和敏涵,周琳,罗国敏,等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.
- HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribut[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [14] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [15] 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 Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [16] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1045-1053.

作者简介:



高仁栋

高仁栋(1993—),男,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网保护(E-mail: grendong@126.com);

吴在军(1975—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网、电能质量分析与控制(E-mail: zjwu@seu.edu.cn);

范文超(1986—),男,山东德州人,博士研究生,主要研究方向为交流微电网保护(E-mail: funchaochao@163.com);

窦晓波(1979—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网(E-mail: dx_b_2001@sina.com);

胡敏强(1961—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断(E-mail: mqhu@seu.edu.cn)。

Line fault location method of VSC-based DC distribution system based on initial current differential value

GAO Rendong, WU Zaijun, FAN Wenchao, DOU Xiaobo, HU Minqiang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the analysis of time domain and frequency domain fault characteristic equations of voltage and current when pole-to-ground fault and pole-to-pole fault occur in the line of voltage source converter-based DC distribution system, current differential equation is deduced, fault is distinguished based on the positive and negative voltage and current variation of different types of fault, and the fault location equation is obtained according to the initial differential value of fault current. The problem of transition resistance is solved by simultaneous circuit equations and the traditional difference algorithm is improved by interpolation algorithm, which solves the high required sampling frequency and big error when differential algorithm replacing differential value. Simulative results verify the correctness and feasibility of the proposed location method and show that the proposed method is simple to calculate with high location accuracy.

Key words: DC distribution system; voltage source converter; fault location; current differential; fault identification; improved difference algorithm