

DOI: 10.7500/AEPS20130221007

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

宋国兵¹, 李德坤², 靳东晖¹, 冉孟兵¹, 靳幸福¹, 郭润生³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 山东电力集团公司济南供电公司, 山东省济南市 250012;
3. 山西朔州供电分公司, 山西省朔州市 036002)

摘要: 提出了一种基于分布参数模型的柔性直流输电线路单端故障定位原理。由于柔性直流输电线路两端并联有大电容, 直流线路发生单极接地故障后, 1 模故障分量网络中的电压行波具有以下 2 个特点: 在两端直流母线处全反射, 故障点处主要为折射; 反射改变极性, 折射不改变极性。据此可以在 1 模故障分量网络中计算本端第 1 次电压反射波及其前行路径上的电压分布, 找出该电压分布的最强正跳变点, 该点到对端的距离即为故障距离。该方法的故障定位精度高, 理论上不受过渡电阻的影响, 无需人工识别行波波头, 易于实现故障定位的自动化, 仿真结果表明该方法具有全线的适用性。

关键词: 柔性直流输电; 故障定位; 单端电气量; 行波电压分布

0 引言

柔性直流输电(HVDC Flexible)可实现有功功率和无功功率的解耦控制, 其输电方式具有经济、灵活、高质量、高可控性的特点, 在实际应用中的控制方式则更加丰富^[1-2]。它不但可以将可再生能源发电和分布式电源接入电网, 还在孤岛供电、城市电网供电、异步交流电网互联等领域具有广阔的应用前景^[3]。为了保障柔性直流输电线路正常稳定地运行, 必须及时查找和清除线路故障。因此, 研究柔性直流输电线路故障定位具有理论意义与实用价值。

直流输电线路故障定位方法可分为故障分析法和行波法^[4]。近年来很多学者对故障分析法作了深入研究: 文献[5]给出一种直流输电线路的双端故障定位方法, 该方法定位精度高、对采样频率要求低; 文献[6]提出仅利用单端电气量的故障定位方法, 但易受对端换流器调节作用的影响; 文献[7]针对柔性直流输电线路提出一种利用电流固有频率的故障定位原理, 取得了较好的效果。目前投入商业运行的直流线路故障定位方法仍以行波法为主^[8-12]。行波故障定位通过标定 2 个行波波头之间的时间差来实现故障定位。该方法响应速度快且理论上不受线路类型、过渡电阻、两侧系统参数、故障类型等因素的影响, 具有较高的测距精度。但它很难区分故障点处和对端母线处的反射波, 需要人工介入识别行波波头, 因此, 很难实现故障定位的自动化。

鉴于目前直流输电线路故障定位研究现状, 本文针对最为常见的两电平或三电平换流器结构的柔性直流输电线路, 提出一种利用行波电压分布特征的自动故障定位方法, 它在 1 模故障分量网络中标定本端第 1 次电压反射波及其前行路径上电压分布的最强正跳变点所处的位置实现故障定位。理论分析和仿真验证表明, 该方法原理正确且具有较高的定位精度, 可实现故障定位自动化。

1 柔性直流输电系统结构

图 1 所示即为柔性直流输电系统结构简图。图中 j 端代表整流侧, k 端代表逆变侧。该系统采用电压源换流器的结构, 明显的特征就是在两侧换流站并联很大的电容。

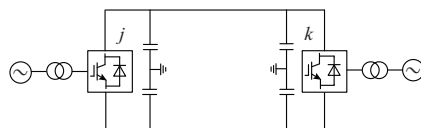


图 1 柔性直流输电系统结构
Fig.1 Structure of HVDC Flexible transmission system

研究发现, 并联电容的结构特征使得故障后短期内, 两端的换流站在 1 模故障分量网络中可以近似等效为电容, 进而得出电压行波具有在两端直流母线处全反射、故障点处反射弱以及反射改变极性、折射不改变极性的特点。以上是本文故障定位方法实现的基础, 下面将从电容等效以及直流母线处、故障点处的折反射特征分别进行分析。

收稿日期: 2013-02-21; 修回日期: 2013-06-27。
国家自然科学基金资助项目(51177128, 51037005); 教育部博士点基金资助项目(20110201110056)。

2 故障行波折反射分析

2.1 1 模故障分量网络电容等效

柔性直流输电线路故障后,1 模故障分量网络严格上应该用图 2(a)表示,即不能忽略换流站的影响,其中 Z_{rec}, Z_{inv}, R_f, C 分别为整流站等效阻抗、逆变站等效阻抗、接地过渡电阻、换流站并联电容; Δi_{j1} 和 Δi_{k1} 分别为整流侧和逆变侧直流线路的 1 模故障分量电流; Δi_{jcl} 和 Δi_{kcl} 分别为整流侧和逆变侧并联电容注入直流线路中的 1 模故障分量电流; Δi_{rec1} 和 Δi_{inv1} 分别为整流站和逆变站注入直流线路中的 1 模故障分量电流。图 2(b)为故障后短时间内的等效网络,其中 u 代表行进到直流母线处的电压初始行波,幅值为 E 。

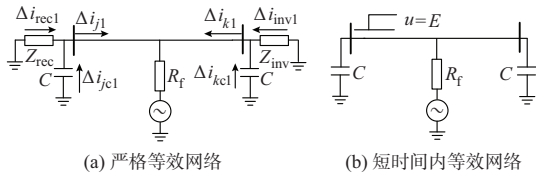


图 2 1 模故障分量网络

Fig.2 One-mode fault component network

为说明换流站可以等效为电容的合理性,现对图 2(a)中各 1 模故障分量电流进行仿真考察,其波形如图 3 所示。其中仿真的线路长度为 1 000 km, 正极金属性接地故障发生在距整流侧 300 km 处, 故障时刻为 1.5 s, 图中给出故障前 0.5τ 和故障后 3τ 范围的波形(τ 为 1 模行波从线路本端传到对端所需要的时间)。

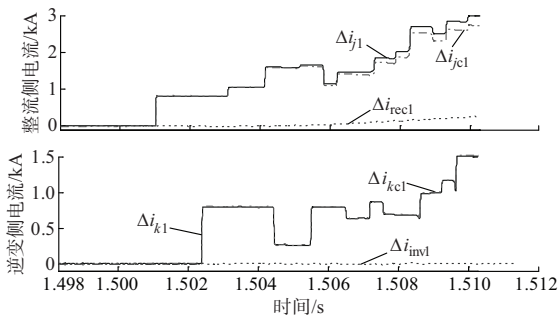


图 3 故障分量电流波形

Fig.3 Current waveforms of fault component

从图 3 可以看出,在故障后 3τ 范围中,电容上的 1 模故障分量电流 Δi_{jcl} 和整流侧线路的 1 模故障分量电流 Δi_{j1} 近似相等,并且整流站注入直流线路的电流 Δi_{rec1} 几乎为 0,即可以近似认为整流站不向线路提供 1 模故障分量电流,该分析同样适用于逆变侧。因此,1 模故障分量网络在故障后 3τ 范围可以等效为图 2(b)所示的网络,即两端换流站系统

在故障后短期内能够等效为电容。

2.2 直流母线处行波折反射分析

由 2.1 节电容等效可知,故障后的短期内,1 模故障分量网络见图 2(b)。根据彼得逊法则,直流母线处行波折反射规律可用图 4 所示等效电路表示。

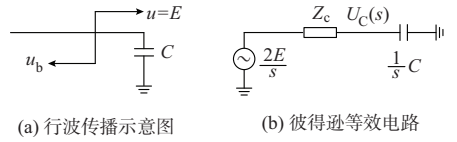


图 4 等效电路

Fig.4 Equivalent circuit

在图 4(a)中, u_b 为入射波 u 在电容处的反射波; Z_c 为输电线路的波阻抗。图 4(b)即为彼得逊等效电路,为求解方便,此处用拉普拉斯变换的形式表示,其中 $U_c(s)$ 为电容电压。根据分压原理易得:

$$U_c(s) = \frac{2E}{s} \frac{\frac{1}{s}C}{Z_c + \frac{1}{s}C} = 2E \frac{\frac{1}{C}Z_c}{s\left(s + \frac{1}{C}Z_c\right)} \quad (1)$$

将式(1)变换到时域可得:

$$u_c = 2E(1 - e^{-\frac{t}{CZ_c}}) \quad (2)$$

电容上的电压为入射波和反射波之和,即

$$u_c = u + u_b \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)可得反射波为:

$$u_b = u_c - u = E - 2Ee^{-\frac{t}{CZ_c}} \quad (4)$$

由式(4)可见,入射行波在刚到达直流母线处,即 $t=0$ 时,反射波电压 $u_b = -E$,也就是说电压行波在到达电容处时的瞬间发生了全反射,并改变极性。该特点可用反射系数 K_C 表示,记为 $K_C = -1$ 。

2.3 故障点处行波折反射分析

文献[13]得出在双极直流输电线路中电压行波不仅会发生相同模量间的折反射,还会发生不同模量间的折射,此特点可用下述折反射系数表示:

$$\left\{ \begin{aligned} K_{11} &= \frac{-Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ H_{11} &= \frac{Z_{c0} + 4R_f}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ H_{10} &= \frac{-Z_{c0}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ K_{00} &= \frac{-Z_{c0}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ H_{00} &= \frac{Z_{c1} + 4R_f}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ H_{01} &= \frac{-Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

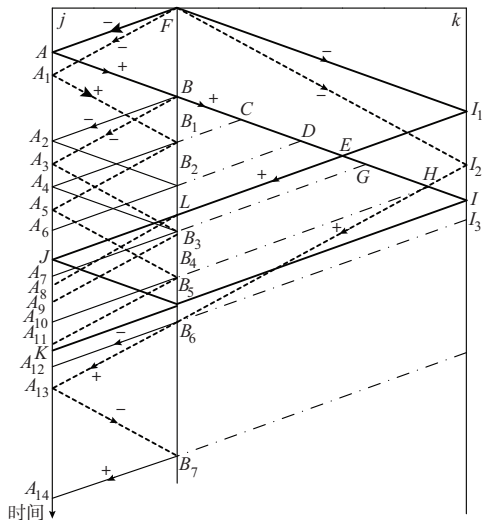
式中: Z_{c1} 和 Z_{c0} 分别为输电线路 1 模和 0 模波阻抗; K_{11} 和 H_{11} 分别为 1 模电压行波间的反射系数和折射系数; H_{10} 为 1 模到 0 模的电压行波折射系数; K_{00} 和 H_{00} 分别为 0 模电压行波间的反射系数和折射系数; H_{01} 为 0 模到 1 模的电压行波折射系数。

由 H_{11} 的表达式不难得到 1 模电压行波间的折射系数会随着过渡电阻的增大而增大, 则当过渡电阻为 0 时有最小值 $H_{11min} = Z_{c0} / (Z_{c0} + Z_{c1}) \approx 2/3$, 因此, 1 模电压行波在故障点处的折射要大于反射, 且根据 K_{11} 和 H_{11} 的表达式可见, 故障点处反射改变极性, 折射则不改变极性。

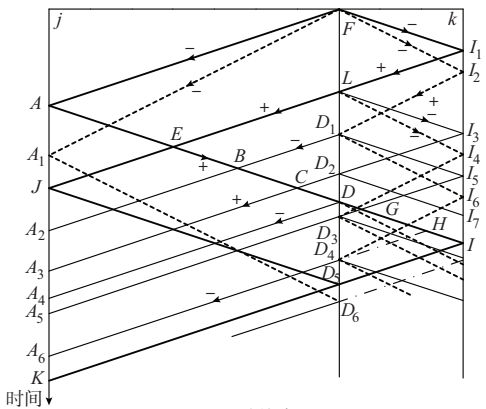
综上可得 1 模故障分量网络中的电压行波特点为: ①在直流母线处会发生全反射, 在故障点处折射要大于反射; ②反射改变极性, 折射不改变极性。

3 行波网格图分析

本文的故障定位方法是基于行波传播规律实现的, 因此有必要对图 5 所示的行波网格图进行分析。



(a) 近端故障



(b) 远端故障

图 5 行波网格图

Fig.5 Grid diagram of travelling wave

图 5 是故障分量网络下的行波网格图; F 代表故障点; 实线代表 1 模电压行波, 虚线代表 0 模电压行波; 折反射较弱的行波用细线表示, 折反射较强的行波用粗线表示; 点划线代表行波的反向延长线。

此外, 文献[13]证明故障点处的电压初始行波可用式(6)求得:

$$\begin{cases} U_0 = \frac{-\sqrt{2}Z_{c0}U}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ U_1 = \frac{-\sqrt{2}Z_{c1}U}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U 为故障前的线路电压; U_0 和 U_1 分别为 0 模和 1 模电压初始行波的大小。由此可见, 各模量的电压初始行波 FA, FA_1, FI_1, FI_2 都是负极性的, 在图中用负号表示; 正极性用正号表示。由图 5 可见, 如果要从 j 端检测到对端直流母线第 1 次反射的 1 模电压反行波 LJ , 至多需要 A 点所在时间后 2τ 时间窗的数据, 即 t_A 至 t_K 。

本节分析旨在得出如下命题是正确的: 无论是近端故障还是远端故障, 在 t_A 至 t_K 时间窗内, j 端接收到的所有 1 模电压反行波中, 来自对端母线第 1 次反射的反行波 LJ 是最强的正极性反行波。

以上命题的正确性是本文故障定位的关键所在, 下面将给出详尽的分析证明过程。

3.1 近端故障

图 5(a) 为近端故障, 故障位置在线路的 $3/10$ 处。由于 B_1 至 B_7 点到 k 侧的前行波及其后续行波和 A_7 至 A_{11} 点的反射波及其后续行波不会在 j 端 t_A 至 t_K 时间窗内产生反行波, 因此为了简明起见, 这些行波没有标示出。此外, 故障点处 1 模到 1 模的电压行波反射较弱, 因此 1 模电压行波 AB 经过 2 次反射得到的行波 B_2A_6 已经很小, 因此行波 B_2A_6 后续的行波也不再标示出。

首先分析 k 端母线处 0 模反射波 I_2B_6 的影响; 易知 I_2B_6 产生的 1 模反行波 B_6A_{12} 是否在 j 端 t_A 至 t_K 时间窗内是与故障距离有关的, 但是 B_6A_{12} 的极性为负却与故障距离无关, 因此不会影响前述命题的证明; I_2B_6 也会产生正极性 1 模反行波 B_7A_{14} , 但是根据行波的行程关系易知, B_7A_{14} 是不在 j 端 t_A 至 t_K 时间窗内的, 因此也不会影响前述命题的证明。

综上所述可知, k 端的 0 模反射波不会影响前述命题的证明, 因此可以将其忽略。则根据前述行波折反射分析以及式(5)可以得出如下结论: ①电压行波在线路两端电容处和故障点处反射会改变极性, 如行波 FA 到 AB 、 AB 到 BA_2 ; ②不同模量间的电压行波在故障点处折射会改变极性, 如行波 AB

到 BA_3 ; ③相同模量间的电压行波在故障点处折射不会改变极性, 如行波 AB 到 BI 。

根据上述极性分析可知: 当近端故障时, 在 j 和 F 点之间, 除了对端第 1 次反射的 1 模反行波 LJ 是正极性的, 其他 1 模反行波都是负极性的, 因此前述命题在近端故障的情况下是成立的。

3.2 远端故障

图 5(b) 所示为远端故障, 故障位置在线路的 7/10 处。类似于近端故障分析可知, j 端母线处 0 模反射波 A_1D_6 不会影响前述命题的证明, 因此也可以将其忽略。由于 L 和 D_1 至 D_6 点折射到 j 侧的 0 模反行波也不会影响前述命题的证明, 这些行波及其后续行波没有标示出。

根据近端故障中的行波极性分析可知: 当远端故障时, 在 k 端的 t_f 时刻之前, 0 模和 1 模反行波都是正极性的, 在此基础上可得如下结论: ①在 F 和 k 点之间的 0 模反行波经故障点折射到 j 端的 1 模反行波都是负极性的, 如 D_1A_2, D_4A_6 ; ②在 F 和 k 点之间的 1 模反行波经故障点折射到 j 端的 1 模反行波都是正极性的, 如 LJ, D_2A_3 。

此外易知反行波 DA_4 是负极性的, 因此只有 k 端的 1 模反行波会影响到命题的证明。 k 端产生的 1 模反行波只有 2 种情况: ①1 模电压行波产生的, 如 I_1L, I_3D_2 ; ②0 模电压行波产生的, 如 I_5D_3 。由于在故障点处 1 模到 1 模电压行波的反射很弱, 因此第 1 种中最强的应该是最初行波 I_1L , 同样第 2 种中最强的也应该是最初产生的反行波 I_5D_3 。

由图可见, 反行波 I_1L, I_5D_3 直接影响着 LJ, D_3A_5 行波的强弱, 因此证明反行波 I_1L 强于 I_5D_3 与证明前述命题等价。由行波的折反射规律可得:

$$\begin{cases} U_{I_1L} = U_{FI_1} K_C = U_1 K_C = \frac{\sqrt{2} Z_{c1} U}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ U_{I_5D_3} = U_{FI_2} K_C H_{01} K_C = U_0 H_{01} = \frac{\sqrt{2} Z_{c0} Z_{c1} U}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{I_1L}, U_{I_5D_3}, U_{FI_1}, U_{FI_2}$ 分别代表电压行波 I_1L, I_5D_3, FI_1, FI_2 的大小。由式(7)可推导出 $U_{I_1L} > U_{I_5D_3}$, 由此可证明前述命题在远端故障情况下也是正确的。

综上所述可知, 无论是近端故障还是远端故障, 在 t_A 至 t_K 时间窗内, 在 j 端接收到的所有 1 模电压反行波中, 来自对端母线第 1 次反射的反行波 LJ 是其中最强的正极性反行波。

4 沿线电压分布的计算

基于以上分析, 本文提出利用行波电压分布特

征的故障定位方法, 该电压分布是在 1 模故障分量网络下 j 端第 1 次 1 模电压反射波及其前行路径上的计算电压分布, 即路径 AI 上的计算电压分布。图 6 为在分布参数模型下单根有损均匀传输线模型, 其中 Δu_{j1} 和 Δi_{j1} 分别为 j 端的 1 模故障分量电压和电流; Δu_1 为距 j 端 x 处的 1 模故障分量电压。

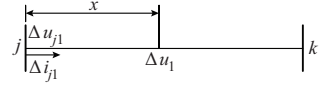


图 6 单根有损均匀传输线示意图
Fig.6 Schematic diagram of single-phase loss uniform transmission line

当采用无畸变模型时, 根据文献[14]可以按下式计算出 t 时刻的 1 模故障分量电压 Δu_1 为:

$$\begin{aligned} \Delta u_1(t) = & \frac{1}{2} [\Delta u_{j1} \left(t - \frac{x}{v_1} \right) + \Delta i_{j1} \left(t - \frac{x}{v_1} \right) Z_{c1}] \cdot \\ & e^{-\frac{R_1 x}{Z_{c1}}} + \frac{1}{2} [\Delta u_{j1} \left(t + \frac{x}{v_1} \right) - \Delta i_{j1} \left(t + \frac{x}{v_1} \right) Z_{c1}] e^{\frac{R_1 x}{Z_{c1}}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: R_1 为线路单位长度的 1 模电阻; v_1 为 1 模波速度。根据行波的折反射规律以及式(8)可知: 当线路任何位置发生故障后, 若要计算出路径 AI 上的电压分布, 至多需要故障后 3τ 的电气量数据。

5 故障定位原理

观察式(8)的结构可知: 计算路径 AI 上电压分布的过程就是将 j 端 A 时刻的前行波电压 AB 和 j 端 t_A 至 t_K 时间窗内各采样时刻的反行波电压逐一相加的结果, 因此不难理解, 这些反行波会在路径 AI 上的计算电压分布中产生相应的跳变, 如图 5 中的 C, E 点。且这些跳变点的强弱是由对应的 j 端的反行波强弱决定的。第 3 节已经证明 LJ 是 j 端接收到的最强正极性反行波, 因此 E 点将是该计算电压分布中最强的正跳变点, 且观察行波网格图的几何关系可知 E 点到对端的距离即是故障距离。

因此, 本文故障定位原理是: 将本端收到故障点传来的第 1 个波头作为起始时刻, 计算沿线电压分布中的最强正跳变点(即 AI 中的最强正跳变点), 通过跳变点的位置确定故障距离。计算公式如下:

$$x_f = l - x_E \quad (9)$$

式中: x_f, l, x_E 分别为故障距离、线路全长、最强正跳变点 E 到测点的距离。为了标定 E 点的位置, 可以对路径 AI 上的计算电压分布求取一阶导数, 导数的最大正值对应的即是 E 点的位置。

此外, 计算路径 AI 上的电压分布时需要标定起始时刻 A , 即初始行波到达测点的时刻。目前行

波故障定位一般将电压行波的采样值超过某一阈值的时刻标定为起始时刻。采样频率的高低直接影响着起始时刻标定的准确性,在行波波速为光速和采样频率为 500 kHz 的情况下,对应的最大定位误差为 300 m。为了准确标定初始行波到达本端的时刻,除了采用高采样率设备外,还可以用求导数法来提高起始时刻标定的准确性^[15]。

需要说明的是,尽管路径 AI 上的计算电压分布在故障点后是虚假的,但由于电压行波在对端母线处发生全反射,且在故障点处主要为折射,因此对端反射波 I_1J 在传播过程中衰减不大,即 AI 与 I_1J 的交点 E 处具有最强的正跳变,该跳变点距离对端的距离即为故障距离,利用该特征即可实现故障定位。因此,故障点后计算的虚假电压分布并不影响本文故障定位的有效性。

6 仿真验证

2010 年 ABB 公司在非洲投入的柔性直流输电工程的架空线长度已接近 1 000 km,本文仿真系统中将架空线长度设为 1 000 km。本仿真采用在 PSCAD 上搭建的柔性直流输电系统模型,该模型采用的控制系统是基于“直接电流控制”的双闭环串级比例-积分(PI)控制器,正极和负极并联电容器均为 1 000 μF ,仿真的数据采样频率为 500 kHz。

输电线路采用分布参数模型模拟,具体参数为: $R_1 = 3.2061 \times 10^{-2} \Omega/\text{km}$;线路单位长度 0 模电阻 $R_0 = 3.3069 \times 10^{-2} \Omega/\text{km}$; $Z_{c1} = 377.7104 \Omega$; $Z_{c0} = 783.72474 \Omega$; $v_1 = 2.9317 \times 10^5 \text{ km/s}$; 0 模波速度 $v_0 = 1.9335 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。

基于前述的故障定位原理,本节进行了 PSCAD 下的仿真验证,鉴于篇幅所限,本文只给出了距离整流侧 300 km 和 700 km 处发生正极接地故障的定位函数图,其过渡电阻分别为 0, 300 Ω ,如图 7 所示,图中跳变点的字母标示与图 5 对应。可见,在 300 km 和 700 km 处故障的情况下,沿线计算电压分布的一阶导数值最大点出现在 700 km 和 300 km 处,因此用线路全长减去该距离即可判定为故障距离。其他情况下的故障定位结果如表 1 所示,可看出,本文算法对全线都有较高的故障定位精度,本文仿真结果的最大测距误差没有超过 0.03%,且故障定位结果不受过渡电阻的影响。其中过渡电阻选为 0, 100, 300 Ω ,测距误差为:

$$\beta = \frac{l_r - l_f}{l} \times 100\% \quad (10)$$

式中: l_r 为测距结果; l_f 为实际故障距离; l 为线路全长。

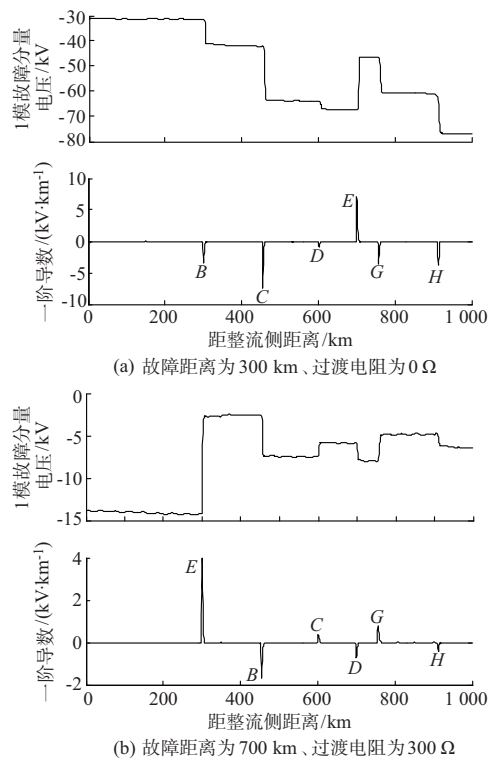


图 7 故障定位图
Fig.7 Diagram of fault location

表 1 测距结果
Table 1 Fault location results

实际故障距离/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	测距误差/%
10.0	0,100,300	10.260 9	0.026 1
100.0	0,100,300	99.970 7	0.002 9
300.0	0,100,300	299.912 0	0.008 8
500.0	0,100,300	499.853 4	0.014 7
700.0	0,100,300	699.794 8	0.020 5
900.0	0,100,300	899.736 1	0.026 4
990.0	0,100,300	990.032 2	0.003 2

7 结语

本文所述故障定位方法具有以下特点:①无需人工识别行波波头。该方法只需求取计算电压分布的导数最大值即可实现故障定位,无需人工介入;②耐过渡电阻能力强。由于过渡电阻越大,1 模电压行波在故障点处的反射越弱,这样就越有利于故障定位的实现,因此理论上不受过渡电阻影响。

参考文献

- [1] 梁旭明,张平,常勇.高压直流输电技术现状及发展前景[J].电网技术,2012,36(4):1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 刘钟洪,宋强,刘文华.基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J].电力系统自动化,2010,34(2):53-58.

- LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 30(1): 1-10.
- XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 30(1): 1-10.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [5] 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 Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [6] 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 model [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [7] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
- CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [8] DEWE M B, SANKAR S, ARRILLAGA J. Application of satellite time references to HVDC fault location [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1295-1302.
- [9] 翟永昌. 实用高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(5): 70-73.
- ZHAI Yongchang. Practical fault location method of HVDC power transmission line [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 70-73.
- [10] 赵妍卉, 王少荣. 基于小波模极大值理论的 HVDC 输电线路行波故障定位方法的研究[J]. 继电器, 2007, 35(1): 13-17.
- ZHAO Yanhui, WANG Shaorong. Research of HVDC transmission line traveling-wave fault location method based on wavelet modulus maxima theory [J]. Relay, 2007, 35(1): 13-17.
- [11] 李学鹏, 金玉生. 基于数学形态学暂态特征提取的高压直流输电线路精确故障定位[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 20-25.
- LI Xuepeng, QUAN Yusheng. Accurate fault location for HVDC transmission line based on transient extraction of mathematical morphology [J]. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 20-25.
- [12] 束洪春, 王超, 张杰, 等. 基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 6-9.
- SHU Hongchun, WANG Chao, ZHANG Jie, et al. HVDC transmission system fault identification and locating algorithm using mathematical morphology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 6-9.
- [13] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
- LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [14] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

宋国兵(1972—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统继电保护. E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

李德坤(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向: 电力系统继电保护. E-mail: lidekun@yeah.net

靳东晖(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护.

(编辑 孔丽蓓)

One-terminal Fault Location for HVDC Flexible Transmission Lines Based on Wave Voltage Distribution Features

SONG Guobing¹, LI Dekun², JIN Donghui¹, RAN Mengbing¹, JIN Xingfu¹, GUO Runsheng³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Jinan Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Jinan 250012, China;

3. Shanxi Shuozhou Electric Power Supply Company, Shuozhou 036002, China)

Abstract: A one-terminal fault location method for high voltage direct current (HVDC) Flexible transmission lines based on distributed parameter model is proposed. As high-capacity capacitors are connected to both ends of HVDC Flexible transmission lines, in the network of one-mode fault component, the voltage travelling waves have the following two features: total reflection of voltage traveling wave occurring at both DC buses of two-terminal HVDC transmission system and at the fault point the refraction of traveling wave stronger than the reflection; the polarity of voltage traveling wave changed due to reflection rather than refraction. Then, the voltage distribution of the first reflected wave at the measuring point and its forward path can be calculated. Finally, the strongest positive switching point in the voltage distribution can be found, and the distance from this point to the opposite terminal is the fault distance. This method has a satisfactory precision and is not affected by transition resistance theoretically. Besides, there is no need to artificially recognize the wave front of the traveling wave and the automation of fault location is easy to implement by use of the proposed algorithm. Simulation results show this method is applicable to the whole line.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177128, No. 51037005) and Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 20110201110056).

Key words: high voltage direct current (HVDC) Flexible; fault location; one-terminal data; wave voltage distribution