

# 基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法

李小鹏<sup>1</sup>, 戴文睿<sup>2</sup>, 林 圣<sup>2</sup>, 李世龙<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 输电线路是高压直流输电系统中故障率最高的元件。针对现有输电线路行波保护耐过渡电阻能力差, 存在难以识别区内高阻故障和远端区外金属性故障的问题, 提出了一种高压直流输电线路单端保护方法。基于高压直流输电系统拓扑, 分析了高压直流输电线路区内和区外故障电流的特征, 从而利用小波变换提取高频分量电流构建保护方法。仿真结果表明, 该方法不受过渡电阻、故障距离影响, 保护可靠性高。

**关键词:** 高压直流; 输电线路; 单端保护; 高频分量; 小波变换

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)02-0033-03

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.007

## Single-ended Protection Method for HVDC Transmission Line Based on High Frequency Component

Li Xiaopeng<sup>1</sup>, Dai Wenrui<sup>2</sup>, Lin Sheng<sup>2</sup>, Li Shilong<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Transmission line has the highest failure rate in HVDC system. In view of the poor performance to transition resistance of the existing traveling wave protection of transmission line, it is difficult to identify the high resistance internal fault and the low resistance external fault, a single-ended protection method for HVDC transmission line is proposed. Based on the topology of HVDC transmission system, the characteristics of internal and external fault current are analyzed, the high frequency component current is extracted by wavelet transform, and the protection method is constructed. The simulation results show that the proposed method has high protection reliability, and cannot be affected by the transition resistance and fault distance.

**Key words:** HVDC; transmission line; single-ended protection; high frequency component; wavelet transform

## 0 引言

中国一次能源与电力负荷的逆向分布特性决定了高压输电将在中国电网结构中占据日益重要的地位。相比于高压交流输电, 高压直流输电传输距离远、传输功率大、经济效益好, 使其在远距离输电中脱颖而出<sup>[1]</sup>。目前, 中国电网共建成并投运高压直流输电工程 20 多个, 形成大规模“西电东送”“北电南送”的能源配置格局。到 2020 年, 跨区、跨国电网输送容量将达到 410 GW, 西北地区到东部的输送距离达 2000~3000 km 以上<sup>[2]</sup>。

由于输电距离远、输电线路长且周围环境恶劣,

容易出现区内短路等故障。根据现场运行经验, 区内线路故障约占直流输电系统全部故障的 50%, 而区内线路故障发生后由线路保护正确动作、断开故障线路的只有 50%。另一半的区内线路故障是由直流控制系统响应动作, 但直流闭锁、关闭整个输电系统的送端, 引起不必要的系统停运会造成巨大的设备损耗和经济损失<sup>[3]</sup>。

理想的直流输电线路保护对位于线路两侧电流测点之间的线路区内故障进行动作, 而对测点之外的区外故障应当不动作而由控制系统响应动作<sup>[4]</sup>。中国高压直流输电线路配置了行波保护, 行波保护以故障后线路出口侧电流中的行波波头电压、电流

变化量和变化率为判据,进行线路故障检测,当计算值超过整定值,输出保护动作信号<sup>[3]</sup>。实际工程运行经验表明,现有行波保护方法存在一定缺陷:1)行波保护无法动作于线路远端过渡电阻大于100 Ω的区内高阻接地故障;2)行波保护会对线路远端区外非高阻接地故障尤其是金属性接地故障误动。其拒动和误动的原因如下:当发生区内远端高阻接地故障时,由于过渡电阻大且故障距离远,使行波保护计算采用的电参量(行波波头电压、电流变化量和变化率)在时域上的变化量显著减小,以致无法满足主动作判据,不能进行保护动作;而发生区外金属性接地故障时,由于过渡电阻极小,会使行波保护计算值满足保护动作判据,发生区内保护误动。因此,行波保护无法正确区分线路远端区内的高阻接地故障和远端区外的金属性接地故障,其可靠性低<sup>[5-6]</sup>。

下面基于高压直流输电系统拓扑结构,分析了高压直流输电线路区内和区外故障电流的特征,在此基础上利用小波变换提取特定频段电流,构建保护方法。仿真结果表明,该方法不受过渡电阻、故障距离影响,保护可靠性高。

## 1 故障特征分析

### 1.1 直流输电系统结构

现有高压直流输电系统整流侧结构如图1所示。

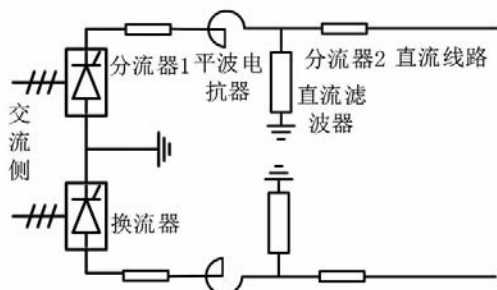


图1 直流输电系统整流侧结构

由图1可知,在平波电抗器和直流滤波器两侧分别安装有分流器1和分流器2,两分流器测得电流分别记作 $i_a$ 、 $i_b$ 。

### 1.2 线路区内外故障特征分析

输电线路故障电流蕴含着丰富的暂态信息,不

同故障位置尤其是区内、外故障受直流线路两侧电抗器和滤波器的影响,传输到测点处的暂态信息区别很大。相比于传统行波保护只利用线路故障电流的时域特征进行故障识别,所提方法采用滤波前后两个故障电流来识别区内外故障,且提取其中最能反应区内故障的暂态信息,其准确性更高。

当故障未发生时,线路处于正常运行工况下,此时,直流滤波器对其两侧的 $12k$ 次基波电流( $k=1, 2, 3, \dots$ ,基波频率50 Hz)有过滤作用,这几个频点仅全频段很小一部分,滤波器对其余电流分量影响很小。故线路正常工作时,电流 $i_b$ 、 $i_a$ 的特定频段差较小,只体现了滤波器两侧电流的自然差异。

#### 1) 区内故障特征分析

当线路区内发生接地故障时,故障点产生的大量暂态高频信号迅速传输到分流器2,因此线路侧电流信号 $i_b$ 所含高频分量丰富;而经过滤波器传输到整流侧后, $i_a$ 的高频分量大大衰减,计算所得特定频段差远远大于系统正常工作及区外接地故障。因此,计算出的两电流信号在所选频段差值很大,能进行可靠的保护。

#### 2) 区外故障特征分析

当线路末端区外发生接地故障时,故障点同样产生大量暂态信号,但由于暂态信号的传播经过逆变侧直流滤波器及整个线路,使 $i_a$ 和 $i_b$ 所含高频分量较之区内故障大大减少,而整流器侧电流 $i_a$ 所含高频分量又在经过整流侧直流滤波器后衰减,故线路侧直流电流 $i_b$ 所含高频分量仍多于整流器侧直流电流 $i_a$ 所含高频分量,且所得特定频段差大于系统正常工作值,但又小于区内故障产生的特定频段差。因此,计算出的两电流信号在所选频段差较小,不会产生保护误动作。

根据以上特点,采取以下方法来构建高压直流输电线路保护方法。

## 2 保护方法

在1.2节中介绍了输电线路区内外故障下,分流器1和分流器2测得故障电流高频分量的含量差

异,利用小波分解提取两分流器电流的高频分量。

### 2.1 小波分解

设  $\varphi(t)$  为平方可积函数,若其对应的傅里叶变换  $\psi(\omega)$  满足式(1),即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (1)$$

则可将  $\varphi(t)$  视为小波母函数。

将小波母函数  $\varphi(t)$  进行如下的伸缩变换及平移变换,可得到在不同尺度下的小波基函数,即

$$\varphi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0, b \in \mathbf{R} \quad (2)$$

式中:  $a$  为伸缩因子;  $b$  为平移因子。

对于函数  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ,其连续小波变换为

$$\begin{aligned} W_f(b, a) &= (f(t), \varphi_{a,b}(t)) \\ &= |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned} \quad (3)$$

将  $\varphi_{a,b}(t)$  中的连续变量  $a$  和  $b$  离散化,此时  $\varphi_{a,b}(t)$  表示为

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (4)$$

式中,  $j$  为小波分解的层数。

对应序列  $f(t)$  的离散小波变换可表示为

$$W_f(j, k) = (f(t), \varphi_{j,k}(t)) \quad (5)$$

选用电力系统故障分析常用的 db4 小波作为小波母函数,设置数据窗长为 3 ms,采样频率为 100 kHz,分解层数为 5 层,分别对故障后电流  $i_a$ 、 $i_b$  进行小波分解。具体分解频段如表 1 所示。

表 1 小波分解频段分布

| 分解层数 | 低频分量范围/Hz  | 高频分量范围/Hz       |
|------|------------|-----------------|
| 1    | 0 ~ 25 000 | 25 000 ~ 50 000 |
| 2    | 0 ~ 12 500 | 12 500 ~ 25 000 |
| 3    | 0 ~ 6250   | 6250 ~ 12 500   |
| 4    | 0 ~ 3125   | 3125 ~ 6250     |
| 5    | 0 ~ 1562   | 1562 ~ 3125     |

记故障后 3 ms 内电流  $i_a$ 、 $i_b$  分别对应的第 3、第 4、第 5 层小波分解系数为  $i_{a3}$ 、 $i_{a4}$ 、 $i_{a5}$  及  $i_{b3}$ 、 $i_{b4}$ 、 $i_{b5}$ 。

### 2.2 保护判据

基于上述计算后,可构造保护判据如式(6)。

$$D > D_{\text{set}}, D = B - A \quad (6)$$

式中:  $D$  为高频分量电流信号差值;  $D_{\text{set}}$  为保护动作值;  $B$  为分流器 2 处的高频分量电流信号小波系数

和,其值等于对 3 个序列  $i_{b3}$ 、 $i_{b4}$  和  $i_{b5}$  中的所有元素进行求和;  $A$  为分流器 1 处的高频分量电流信号小波系数和,其值等于对 3 个序列  $i_{a3}$ 、 $i_{a4}$  和  $i_{a5}$  中的所有元素进行求和。

若  $D$  大于保护动作值  $D_{\text{set}}$ ,则判定线路区内存在故障,输出保护信号,线路保护动作;否则,判定线路区内不存在故障,不输出保护信号。

## 3 仿真分析

为验证所提方法对直流输电线路故障识别的准确性,采用 PSCAD/EMTDC 建立  $\pm 500$  kV 高压直流输电系统仿真模型;设置不同距离、不同过渡电阻的区内故障和区外故障,来考察所提保护方法的性能。线路末端区内发生高阻接地故障时的保护动作情况如图 2 所示,线路末端区外发生金属性接地故障时的保护不动作情况如图 3 所示,更多故障情况下的保护动作情况如表 2 所示。

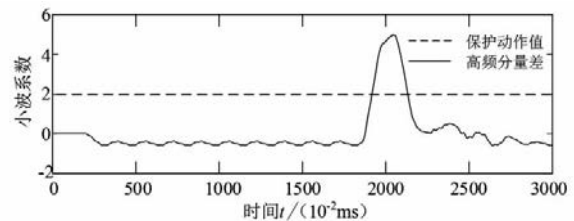


图 2 保护动作情况

由图 2 可知,区内线路远端高阻故障发生时,所提方法得到的高频分量电流信号差值  $D$  明显大于保护动作值,能快速识别并保护动作,表明所提方法对于区内的线路远端高阻故障识别能力强。

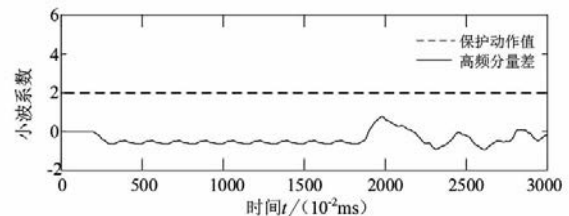


图 3 保护不动作情况

由图 3 可知,区外线路发生金属性(低阻)接地故障时,所提方法得到的高频分量电流信号差值  $D$  小于保护动作值,保护不会动作。

表 2 表明,对于过渡电阻为 100  $\Omega$ 、500  $\Omega$ ,故障距离在 1000 ~ 2500 km 的接地故障,行波保护无法正确动作,但所提方法保护均可准确、快速识别。同时,对区外故障,所提保护方法能够可靠不动作。

(下转第 47 页)

[9] 李雍,周悦,李建明,等. 特高压 GIS 变电站雷电过电压防护研究[J]. 高压电器,2016,52(7):37-44.

[10] 李乐,潘文斌. 电厂升压站侵入波过电压抑制策略研究[J]. 电工技术,2019(23):6-8.

[11] 樊友平,陈艺,白津阳,等. 高压低通滤波器限制雷电过电压的应用方案[J]. 高电压技术,2019,45(4):1256-1265.

[12] 谢海,黄金,孙春日,等. 220 kV 输电线路终端避雷器对断路器断口保护效果的研究[J]. 南方电网技术,2017,11(12):62-67.

[13] 叶育林,刘行,刘晏平,等. 500 kV 多雷区核电厂变电站雷电过电压仿真计算分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):167-172.

[14] 谭逢焘,罗日成,李懿儒,等. 1000 kV GIS 变电站雷电

过电压影响因素分析[J]. 电力学报,2019,34(3):249-255.

[15] 孙秋芹,张永涛,汪泓,等. 江苏 500 kV 电网限流电抗器雷电侵入波过电压特性[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):87-92.

[16] 黄修乾,张文锋,赵淳,等. 500 kV 紧凑型线路雷电反击机理研究[J]. 云南电力技术,2016,44(1):110-114.

[17] 李张秀,江峰,张建波. 一起阻波器闪络故障产生的原因分析及防范[J]. 四川水力发电,2017,36(1):110-112.

作者简介:

刘守豹(1983),博士,高级工程师,主要研究方向为电气系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期:2020-03-02)

(上接第35页)

表2 各种故障情况下保护动作情况

| 故障类型   | 故障距离/km | 过渡电阻/ $\Omega$ | 高频分量电流差值 $D$ | 故障位置判别 | 是否动作 |
|--------|---------|----------------|--------------|--------|------|
| 区内故障   | 1000    | 100            | 22.97        | 区内     | 是    |
|        |         | 500            | 8.02         | 区内     | 是    |
|        | 1500    | 100            | 20.16        | 区内     | 是    |
|        |         | 500            | 7.35         | 区内     | 是    |
|        | 2000    | 100            | 16.69        | 区内     | 是    |
|        |         | 500            | 6.13         | 区内     | 是    |
| 远端区外故障 | 2500    | 100            | 13.54        | 区内     | 是    |
|        |         | 500            | 5.10         | 区内     | 是    |
|        | 0.1     | 0.89           | 区外           | 否      |      |
| 远端区外故障 | 100     | 0.51           | 区外           | 否      |      |
|        | 500     | 0.45           | 区外           | 否      |      |

### 4 结 语

基于高压直流输电系统拓扑结构,分析了输电线路区内故障时故障电流高频部分的信号特征,利用故障信号小波系数构造了保护方法,具有以下特点:

1) 选取能够反应接地故障特征的高频电气量作为保护特征量,所选的频段受故障电阻和故障位置的影响小,提高了区内外故障的识别能力,能够可靠地保护线路全长。

2) 使用 3 ms 的滑动数据窗进行保护判别,减少了瞬时干扰信号对保护判据的影响。同时,仅使用

线路单端电气量,无需在线路两侧进行数据交换,在故障发生后 5 ms 内即可识别区内故障,保护动作速度快。

### 参考文献

[1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.

[2] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

[3] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):123-129.

[4] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.

[5] 张保会,孔飞,张嵩,等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):179-185.

[6] 束洪春,刘可真,朱盛强,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):108-117.

作者简介:

李小鹏(1987),博士,高级工程师,研究方向为高压直流输电控制与保护;

戴文睿(1996),硕士研究生,研究方向为高压直流输电线路保护;

林 圣(1983),教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与故障定位;

李世龙(1989),博士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2020-02-24)