

基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变量方向纵联保护方法

齐国强, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 高压直流输电线路的行波保护存在对装置采样率要求高及耐受过渡电阻能力差等问题。作为后备保护的纵联电流差动保护, 为了防止线路分布电容等问题导致的误动, 失去了速动性的优点, 动作时间较长。利用 HVDC 线路发生区内外故障时, 两端保护装置检测的电压和电流突变量的极性差异, 提出基于 Hilbert-Huang 变换的突变量方向纵联保护方法。在分析不同故障时电压和电流突变量相位差别的基础上, 采用 Hilbert-Huang 变换求取突变量相位差, 识别两者的极性差异, 进而判断故障发生的方向。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了高压直流输电仿真模型, 仿真结果表明, 所提方法在各种故障情况下都能够实现保护的快速识别, 可靠性高, 且受过渡电阻的影响较小。

关键词: 高压直流输电; Hilbert-Huang 变换; 纵联保护; 电压电流突变量

Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform

QI Guoqiang, WANG Zengping

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The traveling wave protection of HVDC transmission line is easily affected by fault resistance and requires high sampling rate of the device. While in order to prevent misuse caused by the line distributed capacitance, operation speed of the current differential protection which serves as a back-up protection is usually slow, losing the characteristic of fast speed. By the difference of the polarities of the fault components of voltage and current detected, this paper proposes a directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform. On the basis of analyzing the difference of the polarities of the fault components of voltage and current for different faults, the polarities of the fault components can be calculated by Hilbert-Huang transform to distinguish different fault directions. Based on PSCAD/EMTDC, a simulation model is built and the simulation results show that the proposed method can effectively identify the various faults with high speed, sensitivity and reliability and is less affected by the transition resistance.

This work is supported by Smart Grid Technology and Equipment Special Subsidy Program of National Research Program of China (No. 2016YFB0900604).

Key words: HVDC transmission line; Hilbert-Huang transform; pilot protection; fault components of voltage and current

0 引言

高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电具有输送容量大、送电距离远、不存在功角稳定问题及潮流快速可控等优点^[1-3], 在远距离电能传输、分布式能源接入电网以及非同步电网互联等领

域具有明显优势, 进行直流线路的继电保护研究也成为了直流输电的重中之重^[4]。

当前高压直流输电主保护配置为行波保护^[5], 但是其容易受过渡电阻的影响, 保护整定值缺乏依据, 需要通过仿真试验进行整定, 而且保护装置需要较高的采样率。为了克服行波保护的这些缺点, 国内外很多学者展开了较多研究。文献[6]分析了 HVDC 线路故障时的行波传播特性及其对行波保护的影响; 文献[7]基于多尺度的小波分解, 分析不同

故障下暂态电压低频与高频能量的比值差异, 构成暂态电压行波保护原理; 基于小波变换, 文献[8-9]求取不同频带的高频电压信号的小波能量, 利用其差异构成保护判据; 文献[10]提出基于极性比较方法的行波保护方案, 可不受过渡电阻的影响。

高压直流输电后备保护主要配置为纵联电流差动保护, 但是由于输电线路分布电容电流的影响, 需要较长的延时以避免保护误动, 因此没有充分发挥出纵联保护动作速度快的优点^[11-12]。利用突变量的差动保护也是国内外学者的研究重点。文献[13]对电压和电流突变量在一定时间内进行积分运算进而构成电压和电流突变量的保护判据; 文献[14]对线路电压和电流突变量进行 S 变换, 进而判断故障方向, 计算速度较快; 文献[15]采用线路两端固有频率主成分特征的保护方案, 充分利用了纵联保护的快速动作的特点。

Hilbert-Huang 变换(HHT)作为一种优秀的时频信号分析方法, 能够自适应地分解信号, 在电力系统信号分析中已广泛用于行波波头检测和谐波检测等方面。文献[16]将改进的 HHT 应用于电力系统的低频振荡分析中, 利用 HHT 后的 IMF1 分量, 文献[17]实现了超高压系统的行波保护, 文献[18]基于 HHT 检测暂态扰动信号, 设计了电能质量检测系统, 能有效分析谐波量。

本文首先分析了 HVDC 线路区内外故障时电压电流突变量极性差异的特点, 利用 HHT 变换对突变量信号进行解析, 计算了电压电流突变量相位差的差异, 从而构成保护判据, 方法简单可靠。最后, 在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建了仿真模型, 测试表明所提方法能正确识别 HVDC 线路区内外故障, 且受过渡电阻的影响较小, 验证了所提方法的适用性。

1 Hilbert-Huang 变换原理

Hilbert-Huang 变换是近年来提出的一种新型的时频分析方法, 可用于非线性非平稳信号处理, 有很强的自适应性。其分析步骤首先是将原信号 $x(t)$ 进行经验模态分解 EMD, 得到若干个固有模态函数 IMF, 再对分解得到的各个 IMF 分量进行 Hilbert 变换。利用相应的 Hilbert 谱, 进一步求解信号的瞬时频率 $f(t)$ 、幅值 $a(t)$ 及相位 $w(t) + \varphi$ 等信息^[19]。

1.1 经验模态分解

进行信号分析的大部分复杂信号一般不可能直接就是固有模态函数, 因此需要应用 EMD 将复杂信号分解成有限多个 IMF 分量再进行后续处理。文献[20]详细分析了 EMD 分解的具体步骤。

固有模态函数指满足以下条件的信号:

- 1) 在任何时间点处, 由局部极大值确定的包络线与由局部极小值确定的包络线的均值为零;
- 2) 在一段数据范围内, 极值点个数与过零点个数必须相等或至多相差一个。

Hilbert-Huang 变换能够自适应地产生基函数, 即筛选过程产生的 IMF 分量。信号经 EMD 分解后, IMF 分量按从高频到低频的顺序依次排列, IMF1 代表最高频分量, 包含了所需的故障信息, 本文便是取其进行 Hilbert 变换, 用于电压和电流突变量相位差的计算。

1.2 Hilbert 变换

Hilbert 变换的定义过程如下: 设 $X(t)$ 是一个任意的时间序列信号, 其 Hilbert 变换 $Y(t)$ 定义为

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\delta)}{t - \delta} d\delta \quad (1)$$

式中, P 代表柯西主值。通过此定义, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 便形成复共轭对, 可以得到解析信号 $Z(t)$ 。

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (2)$$

式中:

$$\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (3)$$

$$a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

式(3)、式(4)和式(5)分别为通过 Hilbert 变换后得到的解析信号相位、幅值和频率关于时间的函数。

2 基于 Hilbert-Huang 变换的直流线路故障判别

2.1 电压、电流突变量特征分析

1) HVDC 输电系统简化等值电路

以单极 HVDC 输电线路为例, 其简化等值电路如图 1 所示。双极 HVDC 输电线路等值电路分析方法类似。其中, E_R 、 E_I 分别表示整流侧、逆变侧的等效电动势, Z_R 、 Z_L 、 Z_I 分别为整流侧、输电线路和逆变侧的等效电阻。

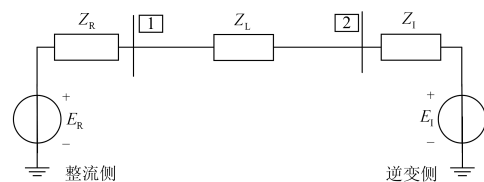


图 1 HVDC 系统简化等值电路

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of HVDC system

2) 直流线路区内故障

根据叠加原理, 当发生HVDC输电线路区内故障时, 故障时的等值电路可分解为正常运行网络和故障分量附加网络。图2即为发生区内故障时的附加网络。其中, U_F 为故障处叠加的电压源, Z_{RL} 、 Z_{IL} 分别为故障点至整流侧和逆变侧保护安装处的等效线路阻抗, R_F 为过渡电阻, Δu_R 、 Δu_I 、 Δi_R 、 Δi_I 分别为故障时整流和逆变侧的电压与电流突变量。

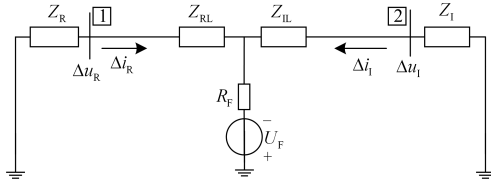


图2 HVDC 线路区内故障时的附加网络

Fig. 2 Fault superimposed circuit for an internal fault on HVDC line

由图2可知, 当发生HVDC线路区内故障时, 有

$$\Delta u_R = -\Delta i_R \cdot Z_R \quad (6)$$

$$\Delta u_I = -\Delta i_I \cdot Z_I \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, Δu_R 和 Δi_R 的极性相反, Δu_I 和 Δi_I 的极性也相反。

3) 直流线路区外故障

当发生 HVDC 输电线路区外故障时, 叠加原理同样适用, 区外故障时故障分量附加网络如图3所示。

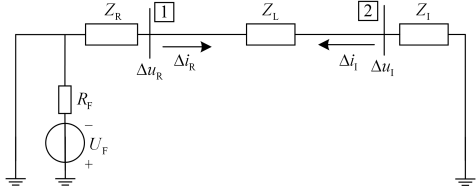


图3 HVDC 线路区外故障时的附加网络

Fig. 3 Fault superimposed circuit for an external fault on HVDC line

由图3可知, 当发生HVDC线路区外故障时, 有

$$\Delta u_R = \Delta i_R \cdot (Z_R + Z_L) \quad (8)$$

$$\Delta u_I = -\Delta i_I \cdot Z_I \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知, Δu_R 和 Δi_R 的极性相同, 而 Δu_I 和 Δi_I 的极性相反。

类似地, 当逆变侧发生区外故障时, Δu_R 和 Δi_R 的极性相反, 而 Δu_I 和 Δi_I 的极性则相同。

2.2 基于 Hilbert-Huang 变换的保护方法

由 2.1 节分析可知, HVDC 线路发生区内区外故障时, 根据线路两侧保护检测到的电压和电流突变量的极性特点, 可构成保护判据, 从而识别区内区外故障。

考虑到发生故障后换流站中调节器的调节过程一般约为 30 ms, 因此, 数据窗的长度不宜超过 30 ms^[21]; 考虑到雷电干扰持续时间一般小于 3 ms, 因此, 数据窗的长度不宜小于 3 ms。综合考虑后, 选取 5 ms 的数据窗。本文仿真采样频率为 20 kHz, 电压和电流突变量的计算间隔取为 10 ms, 则突变量 Δu 和 Δi 分别按式(10)和式(11)计算。

$$\Delta u(N) = u(N) - u(N - 200) \quad (10)$$

$$\Delta i(N) = i(N) - i(N - 200) \quad (11)$$

式中, N 为采样点序号。

本文基于 Hilbert-Huang 变换, 首先对电压和电流突变量 Δu 和 Δi 进行 EMD 分解, 再对其最高频分量 IMF1 进行 Hilbert 变换, 分别求得其相位信息, 并求得相应突变量的相位差。

本文提出的新型突变量方向保护方案进行故障识别的流程图如图4。

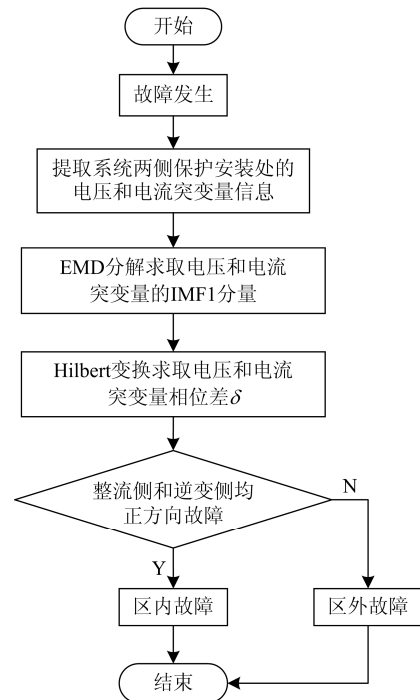


图4 保护原理框图

Fig. 4 Block diagram of the protection principle

综上所述, 当整流侧和逆变侧保护装置均识别为线路正方向故障时, 才最终判断发生了HVDC线路的区内故障。其他情况下, 均判断为HVDC线路的区外故障。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

利用 PSCAD/EMTDC 搭建了如图5所示的单

极 HVDC 输电系统仿真模型, 采用双 12 脉动换流阀, 变压器分别为 Y/Y 和 Y/ Δ -11 接线形式。系统参数设置为: 额定电压 500 kV, 额定功率 1000 MW, 线路长度 1000 km。如图 5 中所示, 设置不同类型的故障, 且对每种故障类型设置不同的接地电阻, 测试所提故障识别方法的正确性, 采样频率取为 20 kHz。

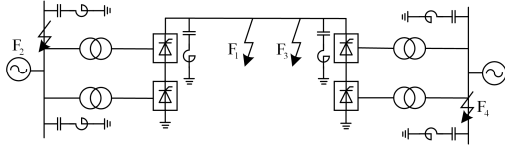


图 5 500 kV 高压直流输电线路模型

Fig. 5 Simulation model of 500 kV HVDC transmission line

3.2 区内故障仿真

如图 5 中所示, 在输电线路中点处设置区内故障 F1。

1) 金属性接地故障。当发生直流输电线路区内金属性接地故障 F1 时, 整流侧保护安装处的电压和电流突变量经 EMD 分解后得到的 IMF1 分量如图 6 所示, 图 7 为 HHT 变换的电压和电流突变量相位及其相位差。

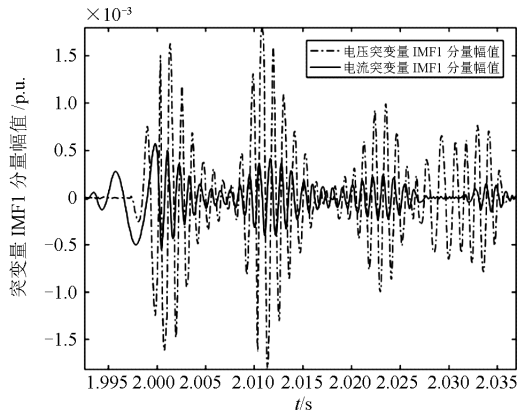


图 6 F1 点故障时整流侧电压电流突变量的 IMF1 分量

Fig. 6 IMF1 of fault components of voltage and current at the rectifier for a fault at F1

2) 非金属性接地故障。F1 点发生过渡电阻为 50Ω 时的非金属性接地故障。为节省篇幅, 不展示出非金属性接地故障时的 IMF1 分量。整流侧和逆变侧保护安装处的电压和电流突变量相位及其相位差如图 8 所示。

由图 7 和图 8 的仿真结果可看出, 整流侧和逆变侧计算得到的相角差均在 180° 附近。理想情况下, 发生区内故障时, 整流侧和逆变侧处保护装置均应判断为正方向故障, 电压和电流突变量相位差

$\Delta\delta$ 均等于 180° 。但是考虑到过渡电阻等因素的影响, 为使保护动作更具灵敏性与可靠性, 设置相位差满足 $160^\circ \leq \Delta\delta \leq 200^\circ$ 时, 保护即判断为正方向发生故障。由图 7 和图 8 可知, 发生区内故障时, 整流侧和逆变侧的保护装置计算的相角差均在判据 $160^\circ \leq \Delta\delta \leq 200^\circ$ 内, 均判断为发生正方向故障, 因此能对 HVDC 的区内故障进行有效识别。

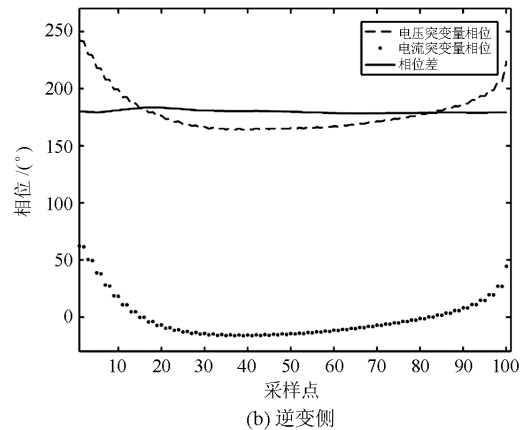
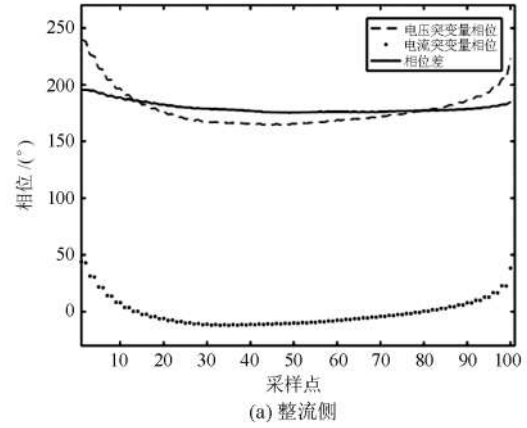
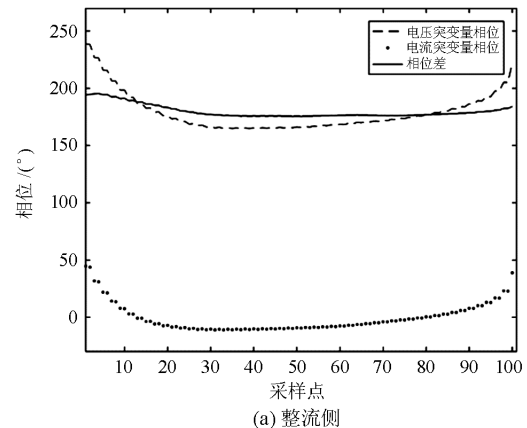


图 7 F1 点故障时线路两侧的 Hilbert-Huang 变换相角曲线

Fig. 7 Hilbert-Huang transform angle curves on two ends of the line for a fault at F1



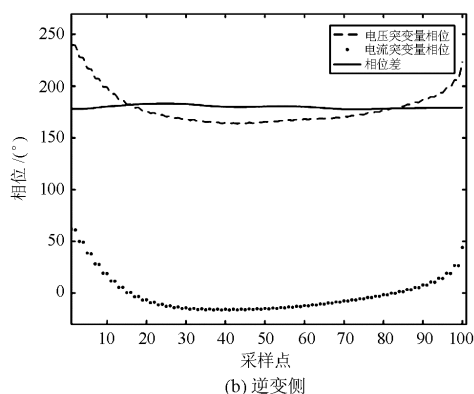


图 8 F1点故障时线路两侧的Hilbert-Huang变换相角曲线

Fig. 8 Hilbert-Huang transform angle curves on two ends of the line for a fault at F1

F1 点发生非金属性接地故障时的仿真结果如表 1 所示。

表1 F1点非金属性故障时整流侧和逆变侧的仿真结果

Table 1 Simulation results of the rectifier and inverter side for a non-metallic fault at F1

过渡电阻 R_F/Ω	整流侧	逆变侧	识别结果
50	正方向	正方向	区内故障
100	正方向	正方向	区内故障
300	正方向	正方向	区内故障

仿真结果表明, 发生区内非金属性接地故障时, 采用 Hilbert-Huang 变换, 计算的突变量相位差在相应的判据内, 整流侧和逆变侧均能有效识别为正方向故障, 所提方法能正确识别 HVDC 线路区内故障且受过渡电阻影响小。

3.3 区外故障仿真

如图 5 中所示, 在整流站外交流母线上设置区外故障 F2。

1) 金属性接地故障。当发生金属性接地故障 F2 时, 整流侧保护安装处的电压和电流突变量经 EMD 分解后得到的 IMF1 分量如图 9 所示, 图 10 为 HHT 变换的电压和电流突变量相位及其相位差。

2) 非金属性接地故障。F2 点发生过渡电阻为 50Ω 时的非金属性接地故障。为节省篇幅, 不列出非金属性接地故障时的 IMF1 分量。整流侧和逆变侧保护安装处的电压和电流突变量相位及其相位差如图 11 所示。

由图 10 和图 11 的仿真结果可看出, 整流侧计算得到的相角差均在 0° 附近, 逆变侧计算的相角差在 180° 附近。在理想情况下, 对反方向故障, 电压电流突变量相角差 $\Delta\delta$ 应等于 0° , 但是考虑到过渡电阻等因素的影响, 为使保护动作更具灵敏性与可靠性, 设置相角差满足 $-20^\circ \leq \Delta\delta \leq 20^\circ$ 时, 保护

即判断为反方向发生故障。正方向故障判据同 3.2 节所述。通过图 10 和图 11 的仿真结果可看出, 发生整流侧区外故障时, 整流侧保护装置计算的相角差为 $-20^\circ \leq \Delta\delta \leq 20^\circ$, 识别为线路反方向故障; 逆变侧的保护装置计算的相角差为 $160^\circ \leq \Delta\delta \leq 200^\circ$, 可识别为 HVDC 线路正方向故障。通过结合整流侧和逆变侧的故障判断结果, 保护方案可正确识别故障类型。

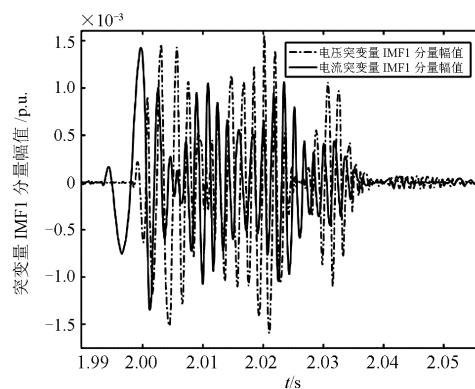
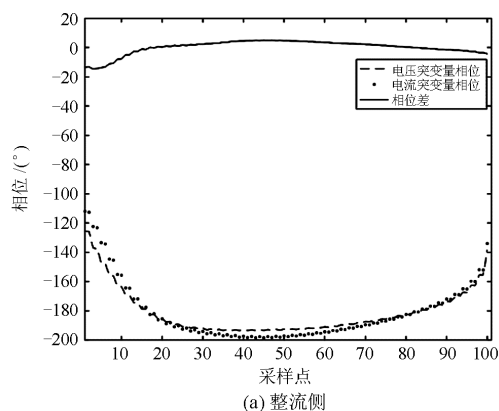
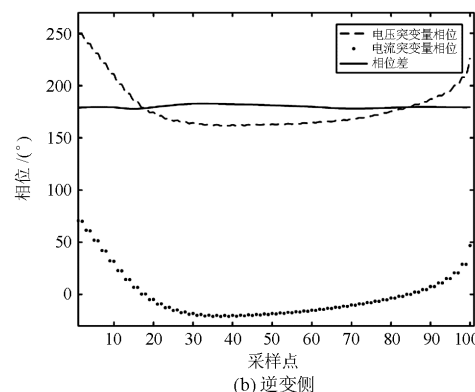


图 9 F2点故障时整流侧电压电流突变量的IMF1分量
Fig. 9 IMF1 of fault components of voltage and current at the rectifier for a fault at F2



(a) 整流侧



(b) 逆变侧

图 10 F2点故障时线路两侧的Hilbert-Huang变换相角曲线
Fig. 10 Hilbert-Huang transform angle curves on two ends of the line for a fault at F2

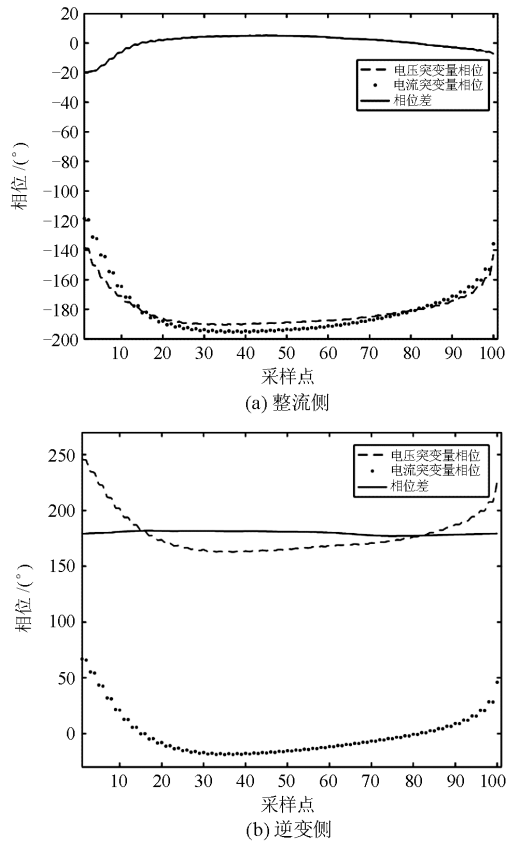


图 11 F2点故障时线路两侧的Hilbert-Huang变换相角曲线
Fig. 11 Hilbert-Huang transform angle curves on two ends of the line for a fault at F2

F2 点发生非金属性接地故障时的仿真结果如表 2 所示。

表 2 F2点非金属性接地故障时整流侧和逆变侧的仿真结果
Table 2 Simulation results of the rectifier and inverter sides for a non-metallic fault at F2

过渡电阻 R_F/Ω	整流侧	逆变侧	识别结果
50	反方向	正方向	区外故障
100	反方向	正方向	区外故障
300	反方向	正方向	区外故障

仿真结果表明, 发生区外非金属性接地故障时, 采用 Hilbert-Huang 变换, 计算的突变量相角差均在相应的故障判据之内, 整流侧识别为线路反方向故障, 而逆变侧识别为线路正方向故障, 通过结合整流侧和逆变侧的判别信息, 所提方法能正确识别 HVDC 线路区外故障, 并且在较大过渡电阻时仍能正确识别故障类型, 受过渡电阻影响小。

3.4 双极模型适应性验证

为验证所提保护方案的广泛适应性, 将保护方案应用到 ± 800 kV 双极直流输电模型中。以正极输电线路发生区内故障为例分析。

当正极线路发生金属性区内故障时, 整流侧保护安装处的电压和电流突变量经 EMD 分解后得到的 IMF1 分量如图 12 所示, 图 13 为经 HHT 变换后电压和电流突变量的相位及其相位差。

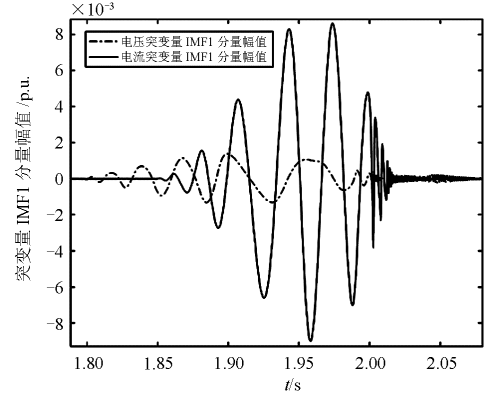


图 12 正极线路区内故障时整流侧电压电流突变量的IMF1分量

Fig. 12 IMF1 of fault components of voltage and current at the rectifier for an internal fault at the positive line

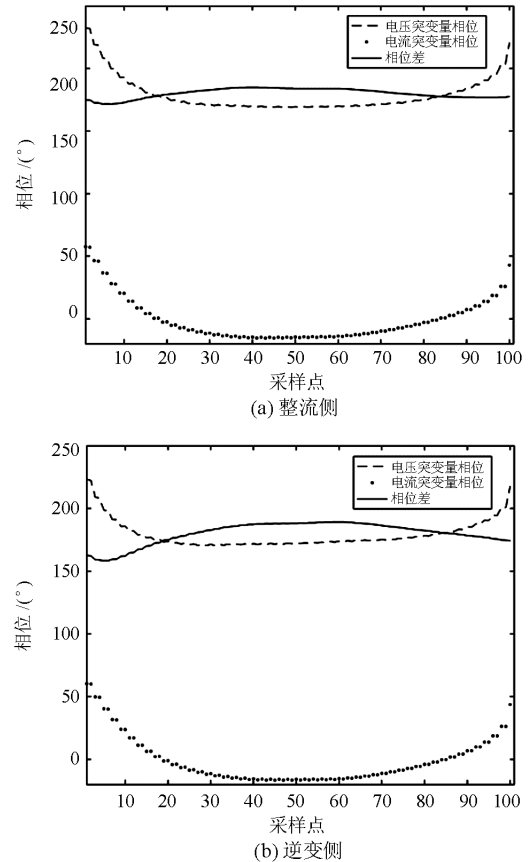


图 13 正极线路区内故障时线路两侧的Hilbert-Huang变换相角曲线

Fig. 13 Hilbert-Huang transform angle curves on two ends of the line for an internal fault at the positive line

由以上仿真结果可看出, 保护方案可识别正极线路区内故障。类似地, 对负极线路区内故障和整流侧、逆变侧的区外故障, 应用本文保护方案得到的仿真结果如表3所示。

表3 ± 800 kV HVDC输电线路各种故障时整流侧和逆变侧的仿真结果

Table 3 Simulation results of the rectifier and inverter sides for various faults of ± 800 kV HVDC transmission line

故障类型	整流侧	逆变侧	识别结果
负极区内	正方向	正方向	区内故障
整流站区外	反方向	正方向	区外故障
逆变站区外	正方向	反方向	区外故障

仿真表明, 通过提取 EMD 分解后的 IMF1 分量进行信号处理, 保护方案对双极直流输电系统也能进行区内外故障识别, 在直流输电系统的多种运行方式下, 本保护方案均能可靠识别故障, 具有广泛适应性。

4 结论

本文分析了 HVDC 线路发生区内区外故障时电压电流突变量极性的差异的特点, 提出了基于 Hilbert-Huang 变换的暂态量相角计算方法。相较于傅里叶变换和小波变换预先选定基函数的缺点, Hilbert-Huang 变换能自适应地产生基函数, 非常适合分析突变信号。所提突变量方向纵联保护方法不需要同步两侧采集的数据, 且仅对两侧故障判别结果进行通信通道传输, 对信道要求也不高。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型进行仿真, 结果表明, 通过结合整流侧、逆变侧的故障判别结果, 可实现 HVDC 线路区内区外故障的有效识别, 并且耐受过渡电阻能力强, 可靠性高。

参考文献

- [1] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 1-4.
- [2] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [3] CHEN G, HAO M, XU Z Q, et al. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 9-21.
- [4] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0012-2
- [5] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.
ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 149-154.
- [6] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [7] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.
LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [8] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 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.
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [9] 陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 等. 基于小波分析的特高压直流输电线路双端电压暂态保护[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2719-2725.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. Wavelet analysis based two-terminal transient voltage protection for UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2719-2725.
- [10] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 高压直流输电线路行波保护影响因素分析及改进[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 76-80.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of influence factors and improvement of traveling waves protections for HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 76-80.

- [11] 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.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [12] 刘剑, 范春菊, 邵能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [13] 邢鲁华, 陈青, 高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 107-113.
XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113.
- [14] 李钊, 邹贵彬, 许春华, 等. 基于 S 变换的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1228-1235.
LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
- [15] 武骁, 何正友, 彭少博, 等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 67-73.
WU Xiao, HE Zhengyou, PENG Shaobo, et al. A UHVDC transmission line pilot protection method based on natural frequencies of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 67-73.
- [16] 杨德昌, REHTANZ C, 李勇, 等. 基于改进希尔伯特-黄变换算法的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 102-108.
YANG Dechang, REHTANZ C, LI Yong, et al. Researching on low frequency oscillation in power system based on improved HHT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 102-108.
- [17] 赵臻峰, 曾祥君, 秦小安, 等. 基于希尔伯特-黄变换的超高压输电线路行波差动保护[J]. 中国电力, 2011, 44(2): 10-13.
ZHAO Zhenfeng, ZENG Xiangjun, QIN Xiaolan, et al. HHT based traveling wave differential protection used on EHV transmission line[J]. Electric Power, 2011, 44(2): 10-13.
- [18] 李文帆, 刘志刚, 孙婉璐. 基于 HHT 的电能质量检测系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 123-127.
LI Wenfan, LIU Zhigang, SUN Wanlu. Development of power quality detection system based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 123-127.
- [19] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [20] 张映鸿. 基于 Hilbert-Huang 变换的高压直流输电线路保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
ZHANG Yinghong. Research on protections of high-voltage direct current transmission line based on the Hilbert-Huang transform[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [21] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 52-56.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 52-56.

收稿日期: 2016-09-30; 修回日期: 2016-12-10

作者简介:

齐国强(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电的保护与控制; E-mail: 985299720@qq.com

王增平(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化、继电保护等方面的研究。

(编辑 周金梅)