

DOI: 10.7667/PSPC171226

基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法

魏德华, 苗世洪, 刘子文, 李力行, 段偲默, 晁凯云

(华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室,
电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了高压直流输电长线路的高频信号衰减作用对目前基于线路边界保护原理的影响。研究了边界的频率特性以及平波电抗器对电流变化率的抑制作用, 进而提出了由单端特征频率电流构造的直流线路故障判别方法。在所提出的直流保护方案中, 使用特征谐波电流幅值构造启动判据, 同时使用特征谐波电流变化量构造保护判据, 算法简便且更加充分地利用了基于线路边界的暂态特征。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了双极 24 脉动直流输电系统模型并进行了仿真分析。结果表明, 该判据能准确地区分区内外故障并进行故障选极, 受过渡电阻和长线路的影响很小, 可以实现全线速动。

关键词: 高压直流输电线路; 线路边界特征; 单端特征频率电流; 直流线路故障判别方法

A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics

WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, LI Lixing, DUAN Simo, CHAO Kaiyun

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper analyzes the influence of the attenuation of long transmission line to high frequency signal on the principle of line boundary protection. Based on the study of boundary frequency characteristics and the suppression of flat wave reactor to the change rate of current, a new method of line protection is proposed, which is composed of single-ended characteristic harmonic current. In the proposed protection method, by using the amplitude of characteristic harmonic current to construct the start criterion and using the variation of characteristic harmonic current as a protection criterion, the algorithm is simple and transient characteristics of line boundary are fully used. A bipolar 24-pulsating HVDC system model is established in PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the criterion can accurately distinguish the fault inside and outside the line and realize the fault pole selection, which is less affected by the transition resistance and long line, and can protect the whole line rapidly.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600) and National Natural Science Foundation of China (No. 51377068).

Key words: HVDC transmission lines; line boundary characteristics; single-ended characteristic harmonic current; method of line protection for HVDC

0 引言

目前, 我国高压直流输电线路保护广泛采用 ABB 和西门子公司的保护和控制装置, 主保护配置行波保护或微分欠压保护, 后备保护配置电流差动

保护, 部分工程也同时配备了低电压后备保护。实际工程运行经验表明, 传统行波保护方案仍存在一定的缺陷, 在直流输电系统故障中线路故障约占 50%, 而线路的正确动作率只有 50%, 有近一半的故障由直流控制系统响应动作, 造成直流闭锁, 引起不必要的停运。因此, 提高直流输电线路继电保护性能, 对于提高电力系统的安全性具有决定性作用^[1-6]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2017YFB0902600); 国家自然科学基金项目资助 (51377068)

电流差动保护作为后备保护受线路分布电容电流影响较大, 电流经过分布电容发生畸变, 致使区外故障时容易发生差动保护误动, 工程上用长延时进行躲避, 而达不到后备保护应有的效果。文献[7]对差动保护进行了改进, 利用电流的精确补偿减小分布电容电流的影响; 文献[8-10]则利用电感模型匹配以及控制角和二次谐波的配合提出了后备保护新原理。基于以上研究, 后备保护的性能得到了有效改善, 但不能从根本上解决直流线路故障正确动作率低的问题。目前学术界更多的研究旨在提出速动性、可靠性更好的主保护。传统行波保护带过渡电阻能力弱且受长线路和噪声的影响, 文献[11-12]将小波变换应用到故障信息的提取, 验证了其在抗噪和准确把握故障信息上的优越性, 但其主要作用在于降噪, 带过渡电阻能力仍有待增强; 文献[13-17]提出了基于突变量特征的直流线路故障判别方法, 通过将故障暂态过程中的突变量特征信息进行整合能够准确地判别线路故障, 这类方法能有效避免过渡电阻的影响, 但需要进行直流线路两端的通信交互, 通信干扰对保护判据会产生不同程度的影响; 文献[1, 18]研究了直流线路边界对故障暂态特征的影响, 分别利用暂态特定频率分量和高低频能量之比进行区内外故障判别, 虽然文中通过大量仿真验证了判据在故障点位置和过渡电阻大小变化情况下的适用性, 但并未考虑到线路长度增加后对所用暂态量的衰减影响。

在上述基于线路边界的暂态量保护研究基础上, 本文从边界频率特性、长线路对高频信号的衰减作用和平波电抗器的电流变化率抑制作用三个方面对故障暂态特征进行了更深入的分析, 使用与暂态分量大小无关的首波变化量极大值构造主要判据, 仿真验证其有效性且能减少长线路的衰减作用影响。

1 故障暂态特征分析

1.1 边界的频率特性分析

高压直流输电系统结构如图 1 所示, 可以看到直流线路上的边界主要由平波电抗器 L 和直流滤波器 F-DC 构成。直流平波电抗器可在直流发生短路时抑制电流上升速度, 防止换相失败; 在小电流时保护电流的连续性; 在正常运行时减小直流谐波。直流滤波器在谐振频率下呈现谐振阻抗, 从而达到抑制直流谐波的目的。通过平波电抗器和直流滤波器电路结构和参数的配合, 可以更有效地抑制谐波, 从而减小其危害, 特别是对抑制通信线路的干扰有利。

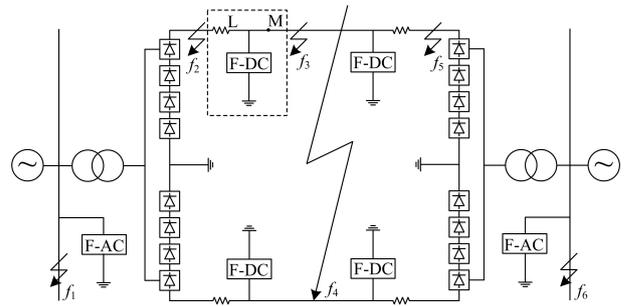


图 1 24 双极系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of the 24 bipolar system

直流电抗器电感值在实际工程中一般取 0.5~1 H。电感值 L_d 越大抑制效果越好, 然而, L_d 也不能过大, 否则运行时容易产生过电压, 并会对自动控制效应迟钝。由 $Z_d=j\omega L_d$ 可知, 阻抗值随着谐波频率的增大而增大, 因而平波电抗器对高频信号的阻隔作用相对于低频信号大的多, 区外故障时的高频分量难以穿越到直流线路上。

图 2 是由三调谐滤波器和双调谐滤波器构成的并联电路, 在特征频率附近有良好的滤波效果, 被用于本系统的直流线路滤波。式(3)为该滤波器的等效阻抗计算值, 据此可得到其幅频响应如图 2 所示。

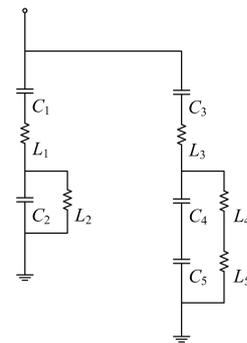


图 2 直流线路滤波电路

Fig. 2 Filter of the DC line

图 3 直观地体现了滤波器在 600 Hz、1 200 Hz 和 1 800 Hz 特征频率附近有较小的阻抗值, 因而特征频率谐波难以穿越到直流线路上。

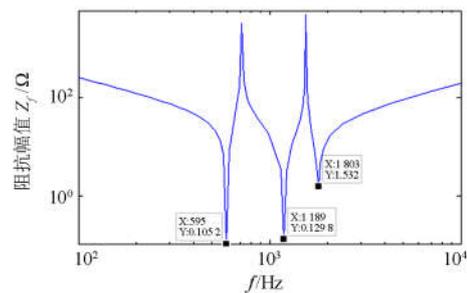


图 3 滤波器幅频响应

Fig. 3 Amplitude response of the filter

利用直流线路边界对高频分量和特征频率分量的阻隔和滤除作用, 可以提出适用的故障判别方法。在经大过渡电阻接地时, 边界的频率特性不受影响, 保护安装处 M 检测到的特征频率暂态量在区内外故障时含量明显不同, 由于 600 Hz 频率相对较小, 谐波含量相对较大, 以 600 Hz 电压电流作为特征量构造判据相对合理。

$$Z_{f1} = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_2} + j\omega C_2} \quad (1)$$

$$Z_{f2} = j(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}) + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_4} + j\omega C_4} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_5} + j\omega C_5} \quad (2)$$

$$Z_f = Z_{f1} \parallel Z_{f2} \quad (3)$$

式中: Z_{f1} 、 Z_{f2} 分别为双调谐和三调谐滤波电路等效阻抗; Z_f 为并联电路等效阻抗; $C_1 \sim C_5$ 、 $L_1 \sim L_5$ 为图 1 中所示的电容电感值。

1.2 长线路对高频信号的衰减作用

对于均匀传输线, 考虑其分布参数特性, 由电路理论知识, 在已知始端电压和电流条件下可以求得行波的向量解。

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1) e^{\gamma x} \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1) e^{\gamma x} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_1 、 I_1 为始端电压和电流; U 、 I 为线路上任一点的电压和电流; Z_c 为波阻抗; x 为距离始端的距离; γ 为传播系数, 忽略线路电阻和电导, $\gamma = \omega \sqrt{LC}$ (L 、 C 为线路上单位长度的电感和电导)。

根据电压电流的传输方程可知, 距离首端的距离越大, 谐波频率越大, 相应的电压电流幅值越小, 即高频信号受长线路的衰减作用明显, 目前基于线路边界的直流保护原理研究大都受其影响, 对于长线路, 在线路末端发生故障时保护安装处所检测到的高频分量或特征频率分量可能无法区分于平波电抗器与整流站之间的区外故障。当线路长度大到一定程度时, 线路对高频量的衰减作用将大于边界的衰减作用^[19]。

1.3 平波电抗器的电流抑制作用

直流线路中, 换相失败是一种常见的故障, 相当于阀内发生短路, 平波电抗器的配置正是为了有效抑制此类故障电流的上升速度。

线路故障中末端发生故障时电流的上升速度最慢, 而整流侧故障由于到达保护安装处不经过线路

其电流的上升速度大于逆变侧故障, 若能验证线路末端故障的特征频率电流上升速度大于平波电抗器与整流站之间发生区外故障时的特征频率电流上升速度, 则可以肯定区内故障相比于区外故障其特征分量的上升速度要快, 利用此暂态特征能够提出实现全线速动的保护动作判据, 接下来以 600 Hz 电流分量作为研究对象完成理论数学分析。

图 4 为直流输电系统等效电路, 图中的阻抗均为 600 Hz 时的等效阻抗, A、B 为故障分析点, M 为保护安装处, 当 A 点发生故障时, 逆变侧距离故障点较远, 由图 2 可知 Z_{Fi} 极小, 暂态过程中, 逆变侧并联电路对所研究的保护安装处特征频率电流影响较小, 可将其等效为接地, 同理, 在分析线路末端 B 点故障时可将其等效为接地, 设 U_f 为故障点电压, 简化分析电路如图 5、图 6 所示。



图 4 直流输电系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of HVDC transmission system

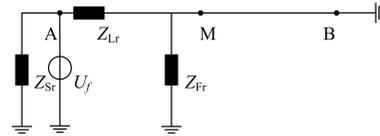


图 5 A 点故障直流系统简化电路

Fig. 5 Simplified circuit of DC system when fault occurs at A

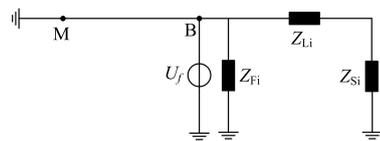


图 6 B 点故障直流系统简化电路

Fig. 6 Simplified circuit of DC system when fault occurs at B

先考虑 B 点故障, 式(4)可简化为

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{U}_1 \cosh(\gamma x) - Z_c \dot{I}_1 \sinh(\gamma x) \\ \dot{I}(x) = \dot{I}_1 \cosh(\gamma x) - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (5)$$

此时 M 视为分布参数电路相量解的末端, 电压依简化电路等效为零, 故障点 B 视为相量解的首端, 代入式(5)计算可得 M 点电流为

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{U}_f}{Z_c \sinh(\gamma x)} \quad (6)$$

根据图 5, A 点发生故障时, B 点视为分布参

数电路相量解的末端, 电压等效为零, M 点视为相量解首端, 代入式(5)计算可得 M 点电压电流关系

$$\dot{U}_M = Z_c \tanh(\gamma x) \dot{I}_M \quad (7)$$

分析整流侧电路构造 KCL 方程可得

$$\frac{\dot{U}_M}{Z_{Fr}} + \dot{I}_M = \frac{\dot{U}_f - \dot{U}_M}{Z_{Lr}} \quad (8)$$

联立式(7)、式(8)解得

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{U}_f}{\left(\frac{Z_{Lr}}{Z_{Fr}} + 1\right) Z_c \tanh(\gamma x) + Z_{Lr}} \quad (9)$$

将直流输电系统具体参数代入式(6)和式(9)可计算出两种不同故障时 I_M 和 U_f 之间的转移阻抗 Z_A 、 Z_B , Z_A 约为 2 kΩ, 呈感性, Z_B 约为 40 kΩ, 呈感性, 在平波电抗器与整流站之间发生故障时的等效阻抗是线路末端故障时的 20 倍, 在其他地方发生故障时, 根据前面的分析, 区外与区内的等效转移阻抗比将更大, 转移阻抗的大小, 决定了故障发生后保护安装处检测到的故障电流 I_M 的上升速度, 区外故障比区内故障时 600 Hz 特征频率电流上升速度明显偏慢, 利用此特征能准确地区分区内外故障。

2 保护装置动作判据

以 600 Hz 特征频率电流作为研究对象, 根据上节的暂态特征分析可知, 高压直流输电系统正常运行时线路上并无特征谐波分量, 发生故障后系统平衡状态打破, 附加故障电势引起 600 Hz 电流增大, 故障点的位置影响着电流的上升速度。因此可以利用特征频率电流幅值作为启动判据, 利用特征频率电流上升速度作为保护判据, 具体分析如下:

$$\begin{cases} I_{600\text{Hz}} \geq I_{\text{set1}} \\ T_{\text{zd}} = 2 \text{ ms} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)为启动判据, T_{zd} 为整定延时, 可适当增大来避免噪声等干扰, $I_{600\text{Hz}}$ 为特征频率电流幅值, 若检测到该幅值超过整定值持续 2 ms 以上可判定有故障发生, I_{set1} 为启动定值, 需要保证在线路末端发生故障时所检测到的特征电流能满足该启动判据, 本文针对所搭建的仿真系统设为 $0.01I_N$, I_N 为线路额定电流。

$$\Delta I_{600\text{Hz}, \text{max}} \geq I_{\text{set2}} \quad (11)$$

式(11)为保护判据, 以 100 μs 前后的特征频率电流之差反应变化率, 故障启动后, 以开始满足启动判据的第一点作为起始点, 计算 5 ms 数据窗内特征电流频率差的最大值即 $\Delta I_{600\text{Hz}, \text{max}}$, I_{set2} 为保护定值, 要求能够区分直流线路末端故障与整流站和平

波电抗器之间的区外故障即可, 本文针对所搭建的仿真系统设为 $0.1I_N$, I_N 为线路额定电流。

$$\begin{cases} \Delta I_1 / \Delta I_2 > 1.2 \\ 0.8 < \Delta I_1 / \Delta I_2 \leq 1.2 \\ \Delta I_1 / \Delta I_2 \leq 0.8 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)为选极判据, 对于双极系统, 当发生单极故障时, 由于线路之间的耦合作用, 非故障极的特征频率电流也会上升, 但由于特征分量穿越到故障极到达保护安装处仍要经过平波电抗器, 电流上升速度受到了抑制, 因此可以用正负极变化率之比 ($\Delta I_1 / \Delta I_2$) 来判别故障极, 双极故障时, 该值接近于 1, 单极故障时, 故障极与非故障极电流变化率之比大于 1, 留有一定的裕度, 将上下限分别定为 1.2、0.8。

雷击线路未发生故障时, 由于雷电行波没有入地通路, 它在线路上发生来回折反射, 直至衰减到零, 暂态过程中不受平波电抗器的抑制, 特征频率电流迅速上升, 能够满足启动判据和保护判据, 因此需要结合新的判据避免雷击干扰。根据雷击干扰时电压波形围绕原直流量值上下变化最终趋于原直流量值的特点, 可以准确地区分雷击干扰^[20]。本文的主要研究内容为长线路对高频信号和特征频率信号的衰减作用, 对雷击干扰不做详细分析。根据以上分析, 可绘制出保护方案流程图如图 7。

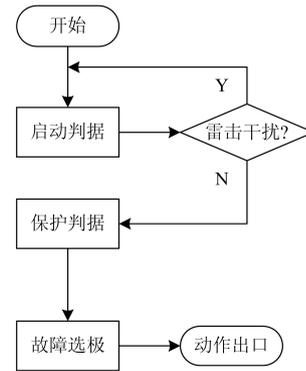


图 7 保护方案流程图

Fig. 7 Flow chart of the HVDC protection

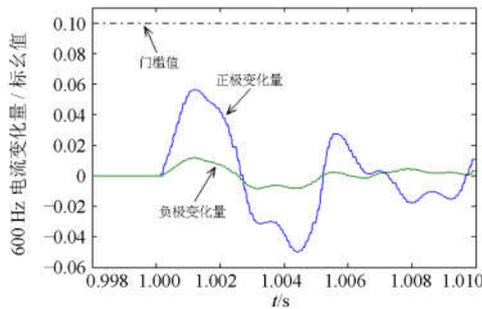
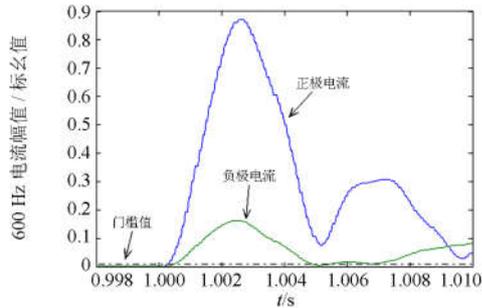
3 仿真实验

为了验证本文所提保护原理的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了双极 24 脉动直流输电系统模型并进行了仿真分析, 结构如图 1 所示, 直流线路额定电压 800 kV, 额定电流 3.125 kA, 滤波器使用文中分析的三调谐滤波和双调谐滤波构成的并联电路, 前面数学分析中的有关参数均从该模型中提取。 $f_1 \sim f_6$ 为不同的故障点或故障类型, f_3 为线路末端故障, f_4 为区内双极故障, 其余均为区外故障,

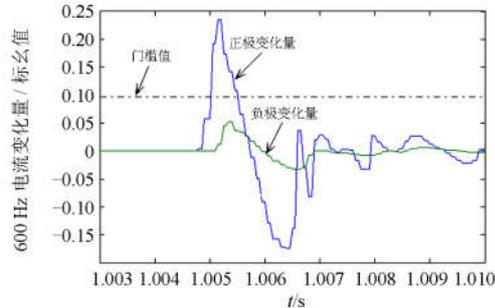
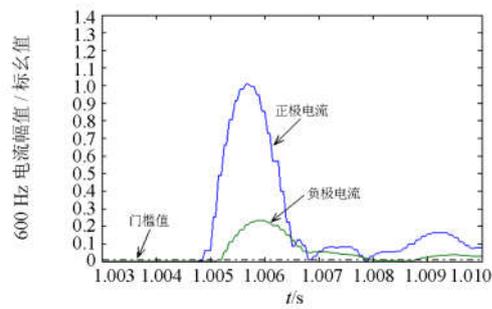
仿真总时长 3 s, 故障设置在 1 s 时发生, 系统的仿真步长选取 $50 \mu\text{s}$ 。

3.1 故障点位置及过渡电阻大小的影响

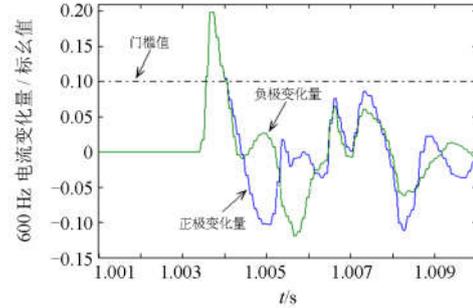
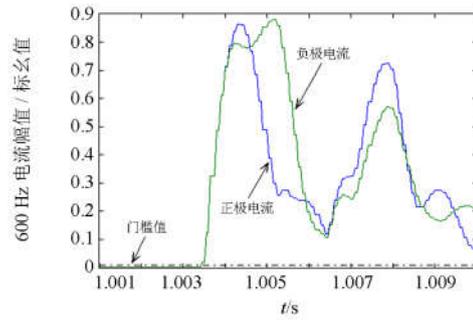
区内外故障的仿真结果如图 8 所示, 图 8(a)为 f_2 发生故障时的特征频率电流变化情况, 此时满足启动判据但电流变化量小于定值, 保护不动作。图 8(b)为 f_3 线路末端发生故障时的电流变化情况, 此时满足启动判据且正极特征电流变化量大于定值, 保护动作。 f_3 线路 1 000 km 处发生双极故障的情况如图 8(c)所示, 此时正负极变化量最大值非常接近且



(a) f_2 发生单极故障



(b) f_3 线路末端发生单极故障



(c) f_3 发生双极故障

图 8 区内外故障仿真结果

Fig. 8 Results of simulation of internal and external faults

大于整定值, 保护动作。其他故障点及具体动作值见表 1, $\Delta I_{1,\max}$ 、 $\Delta I_{2,\max}$ 、 K 分别为各故障点的正负极电流变化量最大值及其比值。

表 1 区内外故障仿真结果

Table 1 Results of simulation of internal and external faults

故障点位置	$\Delta I_{1,\max}$	$\Delta I_{2,\max}$	K
f_1	0.006 8	0.002 1	3.24
f_2	0.056 3	0.011 5	4.90
f_3	0.215 9	0.051 3	4.21
f_4	0.198 5	0.198 5	1.00
f_5	0.024 4	0.005 3	4.60
f_6	0.007 1	0.002 3	3.09

比较图 8(a)、图 8(b) 中的电流幅值变化曲线, 可以发现两种故障情况下的暂态分量幅值已经非常接近, 且线路越长, 可以推断线路末端故障时特征频率电流受到的衰减影响越大。若以特征频率分量的幅值或含量构造保护判据将无法正确地判断区内外故障, 保护原理仍然存在缺陷。

分析表 1 中数据可知, 区内故障的电流变化量最大值相对于区外故障时大, 故障极的电流变化量最大值相对于非故障极大, 对比上节的整定分析, 本文提出的保护动作判据能准确地区分区内外故障并进行故障选极。

以上仿真故障类型均模拟金属性接地, 并未考虑故障点过渡电阻大小对保护判据的影响。现控制

线路参数不变, 逐渐增大过渡电阻, f_3 线路末端发生单极故障时的仿真结果如表 2 所示, 图 9 为过渡电阻增大到 750Ω 时的时域波形图。结合图表分析可知, 增大过渡电阻后线路末端发生故障时保护能够可靠动作。

表 2 过渡电阻变化仿真结果

Table 2 Results of simulation when transition resistance changes

过渡电阻值	$\Delta I_{1,max}$	$\Delta I_{2,max}$	K
250Ω	0.199 3	0.043 6	4.57
500Ω	0.161 8	0.037 8	4.28
750Ω	0.126 1	0.028 6	4.41

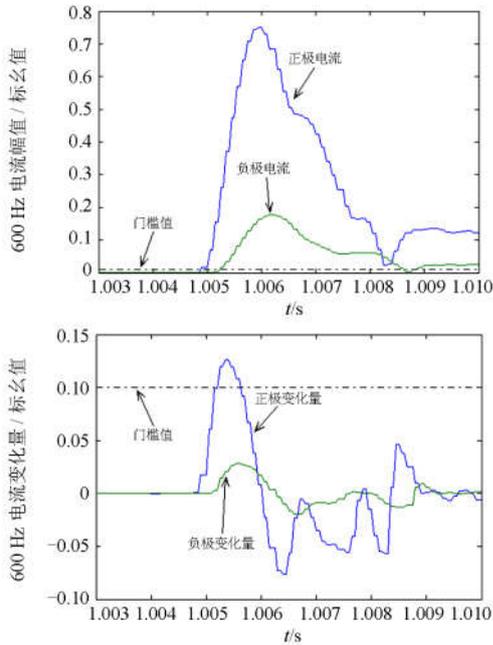


图 9 过渡电阻为 750Ω 仿真结果

Fig. 9 Results of simulation when transition resistance is 750Ω

3.2 高压直流输电线路长度的影响

表 3 为线路长度改变后故障点 f_3 线路末端发生单极故障的判定情况, 图 10 为线路长度增大到 2000 km 时的时域波形图。结合图表分析可知, 线路长度改变后线路末端发生故障时保护依然能够可靠动作。

表 3 线路长度变化仿真结果

Table 3 Results of simulation when length of line changes

线路长度	$\Delta I_{1,max}$	$\Delta I_{2,max}$	K
1000 km	0.224 8	0.051 9	4.33
1500 km	0.196 9	0.050 7	3.88
2000 km	0.162 0	0.0513	3.16

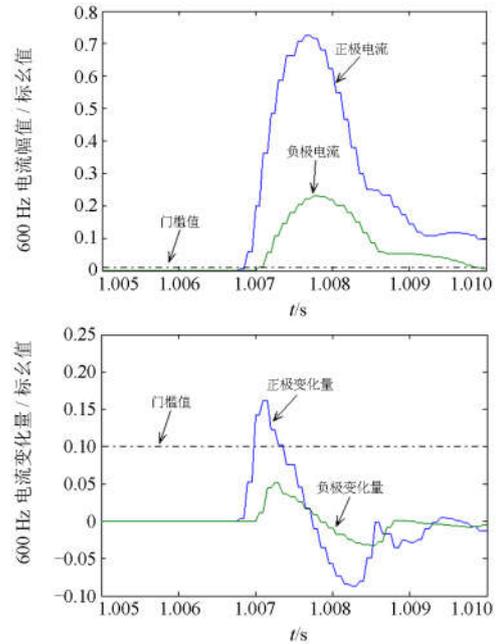


图 10 线路长度为 2000 km 仿真结果

Fig. 10 Results of simulation when line length is 2000 km

根据前面的分析, 过渡电阻和长线路在暂态过程中会抑制特征谐波电流的幅值和上升速度, 严重时可能导致故障出现在区内时保护拒动。仿真结果和分析数据显示, 线路末端作为最容易发生区内拒动的故障点, 在过渡电阻和线路长度改变后保护均能够可靠动作, 可以认为本文提出的保护判据受过渡电阻和长线路的影响小。

4 结论

本文分析了线路边界对特征频率分量的阻隔和滤除作用以及平波电抗器对故障电流上升速度的抑制作用, 提出了由特征频率电流构造的直流线路故障判别方法。该保护动作判据仅利用单端电气量特征, 能弥补传统行波保护带过渡电阻能力弱等缺陷。仿真分析表明, 本文提出的保护判据能准确地区分区内外故障并进行故障选极, 受过渡电阻和长线路的影响很小, 能实现选择性强的全线速动。

参考文献

[1] 李爱民, 蔡泽祥, 任达勇, 等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 72-75.
LI Aimin, CAI Zexiang, REN Dayong, et al. Analysis on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line faults[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 72-75.
- [2] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [3] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [4] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.
- [5] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [6] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 基于多重分形谱的高压直流输电线路区内故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 251-258.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Recognition method of HVDC transmission line fault based on multifractal spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 251-258.
- [7] 毕天姝, 于艳莉, 黄少锋, 等. 超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 30-34.
BI Tianshu, YU Yanli, HUANG Shaofeng, et al. Novel accurate compensation method of capacitance current of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [8] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. ± 800 kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.
- [9] 康晓蒙, 苏勋文, 付松涛, 等. 基于 VSC-HVDC 阻尼控制次同步振荡研究综述[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 1-5.
KANG Xiaomeng, SU Xunwen, FU Songtao, et al. Review on damping control sub-synchronous oscillation based on VSC-HVDC[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 1-5.
- [10] 高金辉, 张兰杰. 一种配电网 Zbus 潮流算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 42-45.
GAO Jinhui, ZHANG Lanjie. A Power Flow Algorithm for Distribution Network Zbus[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2016, 44(1): 42-45.
- [11] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路的极波暂态量保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 96-104.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Protection for ± 800 kV HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 96-104.
- [12] 艾琳, 陈为化. 高压直流输电线路行波保护判据的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 41-44.
AI Lin, CHEN Weihua. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission line[J]. Relay, 2003, 31(10): 41-44.
- [13] 邢鲁华, 陈青, 付兆远, 等. 基于电压和电流突变量的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 61-66.
XING Luhua, CHEN Qing, FU Zhaoyuan, et al. Protection principle for HVDC transmission lines based on fault component of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 61-66.
- [14] 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.
- [15] 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.

[16] 齐国强, 王增平. 基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变方向纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-7.
 QI Guoqiang, WANG Zengping. Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-7.

[17] 邬捷龙, 杜一盟, 袁霞. 基于 VSC-HVDC 稳态响应的解析求解方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 42-45.
 WU Jielong, DU Yimeng, YUAN Xia. Analytic method for solving steady-state response of VSC-HVDC[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 42-45.

[18] 段建东, 万媛, 陆雯, 等. 高压直流输电线路边界保护算法[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(2): 22-27.
 DUAN Jiandong, WAN Yuan, LU Wen, et al. Research on transient-based boundary protection for HVDC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(2): 22-27.

[19] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 134-139.
 CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 134-139.

[20] 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.

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

魏德华(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护测控装置研发;

苗世洪(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、变电站自动化及配电网新技术等; E-mail: shmiao@hust.edu.cn

刘子文(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流混联系统运行与控制。

(编辑 姜新丽)