

基于电流斜率的多端柔性直流输电线路保护方法

刘景睿, 邹贵彬

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250014)

摘要:文中研究了多端柔性直流输电系统在各种故障情况下的故障特征,根据理论分析得出当发生内部故障时,故障线路两端的故障电流方向是相同的,非故障线路两端的故障电流方向相反。提出了一种基于电流斜率的选线方法。通过比较线路两端故障电流的斜率,可以有效地识别出故障线路,可用于柔性直流输电系统的后备保护。最后,利用PSCAD/EMTDC软件建立了张北四端柔性直流电网的仿真模型,并对所提出的保护原理进行了仿真验证。

关键词:故障特征;多端柔性直流电网;直流线路保护;双端量保护

中图分类号:TM 773 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)05-0011-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210503

A Protection Method for Multi-terminal Flexible DC Transmission Line Based on Current Slope

Liu Jingrui, Zou Guibin

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: The fault characteristics of multi-terminal flexible DC transmission system under various fault scenarios are studied. According to theoretical analysis, when an internal fault occurs, the fault current direction on both ends of the fault line is the same; however, the direction of the fault current on both ends of the healthy line is opposite. Then a fault line selection method based on current slope is proposed. By comparing the slope of fault current at both ends of the line, the fault line can be effectively identified, which can be used in the flexible DC transmission systems as a backup protection. Finally, the simulation model of Zhangbei four-terminal flexible DC grid is established by using PSCAD/EMTDC software, and the simulation is carried out to verify the effectiveness of the proposed protection principle.

Key words: fault characteristics; multi-terminal flexible DC grid; DC line protection; dual-terminal protection

0 引言

目前,高压直流线路保护主要以微分欠压保护和行波保护为主保护,低压保护和电流差动保护为后备保护^[1]。行波保护和微分欠压保护可以克服长线分布电容的影响。然而,对于高阻故障,其抗噪声能力较差,并且灵敏度也较低^[2]。电流差动保护动作时间相对较长。低压保护虽然原理较为简单,但缺乏足够的理论依据,且选择性较差^[3]。

文献[4]系统地阐述了行波保护的发展历史、原理、存在的问题以及展望。文献[5]通过对柔性

直流输电系统行波暂态特征的分析,发现线路区外故障时电流行波的能量远高于行波差流的能量值,并提出了一种基于行波能量比的行波差动保护方案,克服了保护区外严重故障而引起的不平衡差动电流的影响。文献[6]提出一种利用线路两端故障电流反行波模量的差值来判断是否发生故障并使用零模量选择故障线路的方法,但是零模量在输电线路上畸变较大,衰减严重,无法用于保护判断。文献[7]中在无损传输线模型的基础上考虑了输电线路基本参数的频变特性,分析了直流线路故障行波产生色散的原因、特点及其在直流线路环境下的主要影响因素,进而分析了末端设备及故障行波色散对直流线路行波保护的影响。文献[8]在传统行波保

护的基础上,利用形态数学方法提取线路两端初始行波波头的信息,形成保护判据。

基于柔性直流系统自身独特的结构特征,也发展出了诸多保护方法。文献[9]中将故障分量模型的系统侧等效为电容,使用时域算法辨识两侧等效电容,提出了一种辨识参数的柔性直流纵联保护方案。文献[10]基于直流线路两端的大电容对高频信号呈现低阻的特性,提出了一种全新柔性直流输电保护原理,利用故障电流高、低频的幅值比来确定区内区外故障。

下面通过分析柔性直流线路的故障特点,提出了一种基于故障电流斜率的新型保护方法,通过比较线路两端的故障电流斜率来判断区内区外故障。

1 故障暂态分析

1.1 仿真模型

所使用的仿真模型是基于 ± 500 kV 中国张北四端柔性直流输电系统所搭建的 ± 500 kV 四端多电平柔性直流输电系统模型,如图 1 所示。

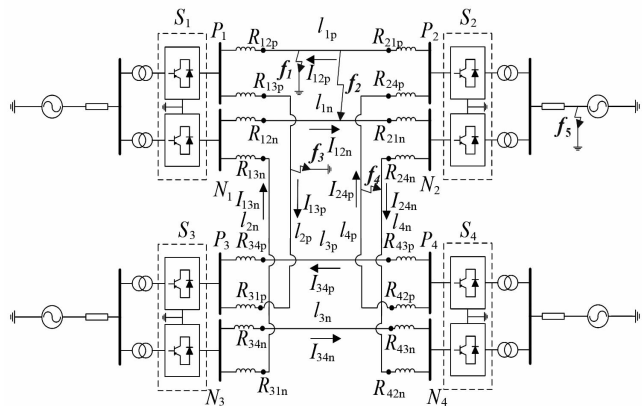


图 1 稳态运行四端 MMC-MTDC 仿真模型

500 kV 的交流电网通过 Yn/ Δ 连接的变压器与换流站连接。系统采用对称双极结构,每个换流站有两组 MMC 换流器,分别连接正极与负极。输电线路采用架空线路形式,线路距地面 28 m,两极线间距为 13.7 m,正常运行时, S_1 、 S_2 、 S_3 换流站的额定功率为 1500 MW, S_4 换流站的额定功率为 3000 MW。4 个换流站的无功功率均为 0。稳态运行情况下,换流站 S_1 、 S_3 作为逆变站, S_2 、 S_4 为整流站。线路参数如表 1 所示。仿真步长为 50 μ s,即 20 kHz。

1.2 故障电流的方向特征

当电力系统发生故障时,可用叠加原理将故障

表 1 线路参数

线路	长度/km	串联电抗/mH
l_1	205.9	200
l_2	188.1	200
l_3	208.4	200
l_4	49.6	300

线路等效为正常运行线路和故障电源单独作用的线路的叠加,以便更好地分析线路故障特征。

定义参考方向为母线到线路,并且将交流系统与换流站一起等效为直流电源,可得到直流线路简图,如图 2 所示。此处整流侧与逆变侧仅用于指代线路两端,若线路两端相邻换流站均是作整流站或逆变站运行,如图 1 中的 S_1 和 S_3 、 S_2 和 S_4 ,此理论依然适用。 U_R 和 U_L 分别为线路两侧的等效直流电压, U_R 为逆变侧电压, U_L 为整流侧电压,通常情况下 U_L 略大于 U_R 。 I_L 和 I_R 分别为整流侧与逆变侧的电流,并且 $I_L = -I_R$ 。

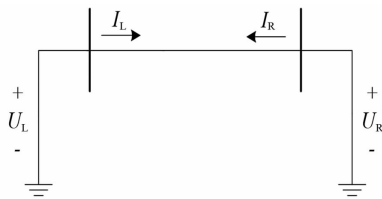


图 2 正常运行线路

当发生故障时,相当于在故障点并联一个与故障前大小相等方向相反的电压源,如图 3 所示, U_f 为故障点叠加电压源, I_f 为故障点处的故障电流。在此模型中忽略了线路阻抗和过渡电阻。 ΔI_R 和 ΔI_L 为发生故障后两端电流的改变量,其方向和参考方向相同。

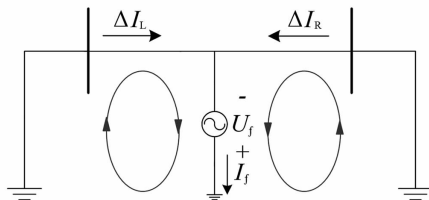


图 3 发生区内故障时的故障附加电路

当发生区外故障时,如图 4 所示为其故障附加电路,整流侧的故障电流 I_L 突变方向与逆变侧故障电流 I_R 相反。

根据上述理论分析,当发生内部故障时,线路两端的故障电流突变方向相同;而发生外部故障时,线路两端的故障电流突变方向相反。

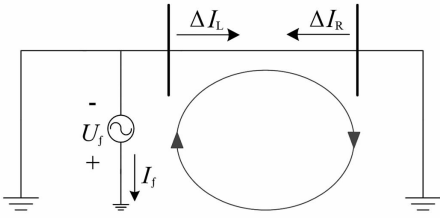


图4 发生区外故障时的故障附加电路

2 保护方法

在故障发生后几毫秒内对故障电流进行采样,记采样窗口内电流最大的时刻为 T_m ,记此时整流侧与逆变侧的故障电流分别为 I_{mR} 和 I_{mL} ,并以此计算线路两端的故障电流斜率 k_R 和 k_L 。

整流侧:

$$k_L = \frac{I_{mL} - I_0}{T_m - T_0} \quad (1)$$

逆变侧:

$$k_R = \frac{I_{mR} - I_0}{T_m - T_0} \quad (2)$$

式中: I_0 为故障初始时刻的故障电流值; T_0 为故障时刻; k_L 和 k_R 分别为故障线路两端整流侧和逆变侧的故障电流斜率。若发生的是区内故障, k_L 和 k_R 的极性相同;若发生的是区外故障, k_L 和 k_R 的极性相反。

若发生的故障是单极故障,由于两极线路耦合的原因,另一极电流也会有小的波动;并且系统正常运行过程中也有噪声干扰保护的动作用,因此需要设置动作门槛 k_{set} 。经过仿真得到 k_{set} 为 0.1 kA/s,有且当 $|k_R| > |k_{set}|$ 和 $|k_L| > |k_{set}|$ 时,保护启动。考虑到灵敏性方面的问题,需当线路两侧故障电流上升到足够大的时候才计算故障电流斜率 k_R 和 k_L ,考虑到各个方面的因素,取采样窗口为故障后 5 ms。

由下列判据实现区内、外故障的判别:

$$S = \text{sgn}(k_R) \cdot \text{sgn}(k_L) = 1 \quad (4)$$

式中,sgn 为符号函数。当满足等式(4)的条件时,则说明发生的是区内故障,否则,则说明发生的为区外故障。具体的保护流程如图5所示。

在正常情况和受到小扰动或噪声时,此判据有极高的选择性,可以准确地判别线路区内、区外故障。但是当有大扰动,如非故障性雷击时,线路电流

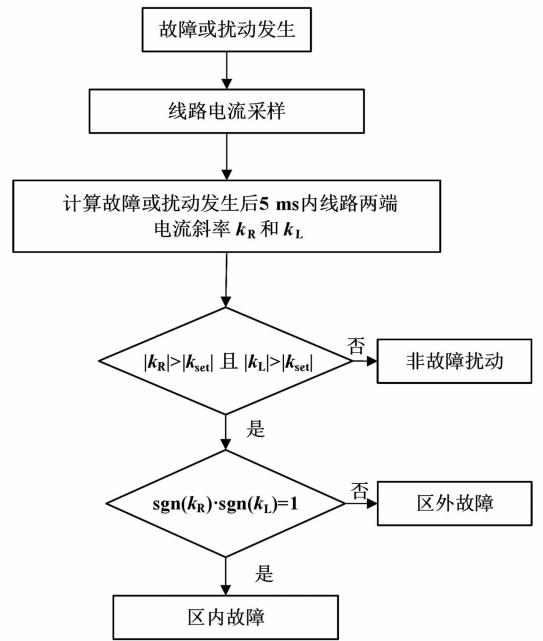


图5 保护流程

也会产生较大的突变,此时电流会产生类似故障时的变化,有可能导致保护误动,对此类干扰,尚待以后继续研究,对所提保护方案提供补充。

3 仿真与分析

利用 PSCAD 搭建如图1所示的柔性直流输电网络模型,并分别在图示位置设置故障进行仿真。通过线路两端的继电保护装置收集故障特征量,并对其分析处理。仿真设置了线路 l_1 的单极接地故障、极间故障、线路 l_4 极间故障、线路 l_2 单极接地故障以及换流站 S_2 入口交流侧三相接地短路5种故障,分别通过仿真得到它们在线路 l_1 两端的故障电流波形并计算出故障电流斜率,以验证所提出的基于电流斜率突变量的保护原理。

3.1 区内故障仿真

3.1.1 单极接地故障

以正极接地故障为例进行分析。故障位置设置在图1中的 f_1 处。分别设置故障位置距离继电保护装置 R_{12} 10 km 和 R_{12} 100 km。图6与图7所示为线路两端的故障电流波形。仿真结果如表2所示。

线路 l_1 的总长度为 205.9 km。从表2的结果中能够看出,此保护方法能够有效地识别故障线路。然而,在一般情况下,线路发生的常常不是金属性短路,因此有必要研究存在过渡电阻时的保护动作情况。仍以正极接地故障为例进行分析,设置故障位

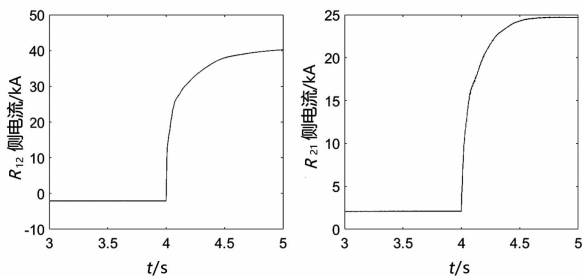


图 6 单极接地故障距 R_{12} 10 km 的故障电流

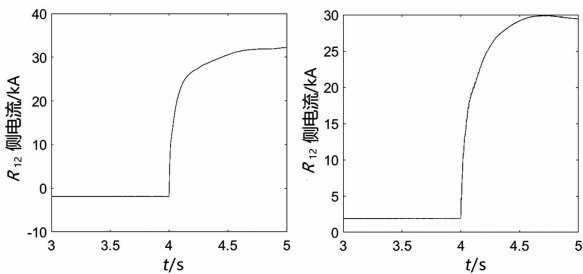


图 7 单极接地故障距 R_{12} 100 km 的故障电流

表 2 区内单极接地故障仿真结果

距离/ km	T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/(kA \cdot ms^{-1})$	$k_L/(kA \cdot ms^{-1})$	S
10	4.005	4	2.271 9	9.73	0.454	3.617 0	1
100	4.005	4	2.683 1	6.120 7	0.536 6	1.224 1	1

置距保护装置 R_{12} 100 km, 过渡电阻为 100Ω 。仿真所得到的故障电流波形和仿真结果分别如图 8 和表 3 所示。

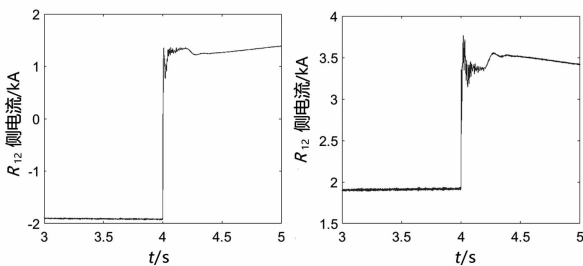


图 8 100Ω 过渡电阻单极接地故障的故障电流波形

表 3 区内单极接地故障有 100Ω 过渡电阻的仿真结果

T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/(kA \cdot ms^{-1})$	$k_L/(kA \cdot ms^{-1})$	S
4.005	4	0.864 8	2.743 2	0.173 0	0.548 6	1

从图 7、图 8 和表 2、表 3 中能够看出, 当过渡电阻增大时, 故障电流的上升速度与幅值将减小, 从而使计算获得的故障电流斜率相应减小, 加大了保护判断难度, 但保护仍然能够准确地判断出故障线路, 说明基于电流突变量斜率的保护方法有一定的抗过渡电阻能力。

3.1.2 双极接地故障

设置故障 f_2 如图 1 所示, 分别设置距离保护安

装处 R_{12} 10 km 和 100 km 的故障进行分析。仿真所得到的故障电流波形和仿真结果分别如图 9、图 10 和表 4 所示。

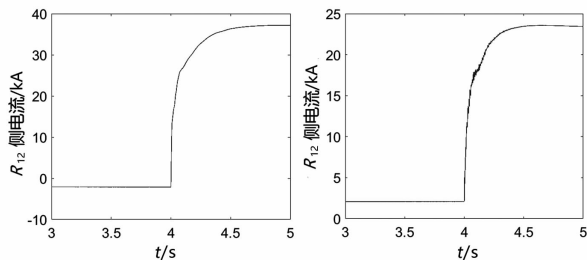


图 9 双极接地故障距 R_{12} 10 km 的故障电流

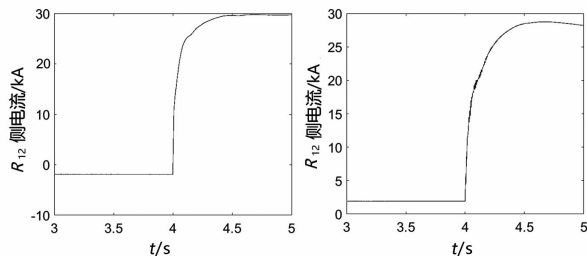


图 10 双极接地故障距 R_{12} 100 km 的故障电流

表 4 区内双极接地故障仿真结果

距离/ km	T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/(kA \cdot ms^{-1})$	$k_L/(kA \cdot ms^{-1})$	S
10	4.005	4	6.517 3	10.272 9	1.303 5	2.054 6	1
100	4.005	4	2.740 9	7.810 0	0.548 2	1.562 0	1

从图 9、图 10 以及表 4 可以得出, 当发生双极短路故障时, 所提出的保护方法能够准确地识别出故障。

下面研究在有过渡电阻的情况下, 此保护方案是否能够准确识别故障。仍以 l_1 双极短路故障为例进行分析, 设置故障位置距保护装置 R_{12} 100 km, 过渡电阻为 100Ω 。仿真所得到的故障电流波形和仿真结果分别如图 11 和表 5 所示。

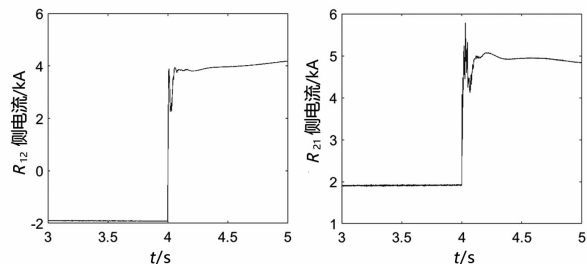


图 11 100Ω 过渡电阻双极接地故障的故障电流波形

表 5 区内双极接地故障有 100Ω 过渡电阻的仿真结果

T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/(kA \cdot ms^{-1})$	$k_L/(kA \cdot ms^{-1})$	S
4.005	4	1.198 1	4.650 5	0.239 6	0.930 1	1

从图 11 和表 5 所示结果能够得出,即使双极短路故障有一定的过渡电阻,所提出的保护方案也能够准确地判别出故障。

3.2 区外故障仿真

3.2.1 单极接地故障

故障设置位置如图 1 中的 f_3 所示。以线路 l_2 发生正极接地故障为例分析发生区外单极接地故障时保护的動作情况。图 12 和表 6 分别为发生故障后线路 l_1 两端的故障电流波形以及故障仿真的结果。

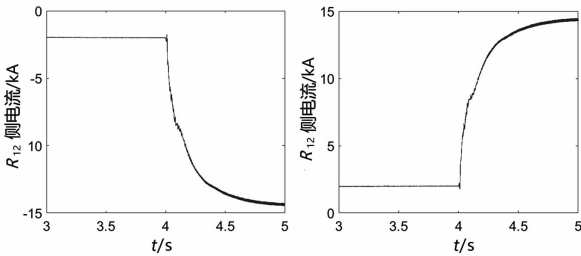


图 12 发生区外正极接地故障 f_3 后 l_1 两端故障电流

表 6 区外单极接地故障仿真结果

T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	$k_L/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	S
4.005	4	0.162 8	-0.261 7	0.032 6	-0.052 3	-1

从图 12 和表 6 的结果中能够得到:当发生区外单极接地故障时,非故障线路 l_1 两端故障电流突变方向相反,因此计算出的线路两端故障电流斜率符号不同;并且其突变速率也小于发生区内故障时,计算出的电流斜率甚至小于于阈值 k_{set} ,因此能够准确识别故障。

3.2.2 双极短路故障

如图 1 中的 f_4 所示,以线路 l_4 发生双极短路故障为例分析区外发生双极短路故障时的保护动作情况。图 13 和表 7 分别为发生故障后非故障线路 l_1 两端的电流波形和仿真结果。

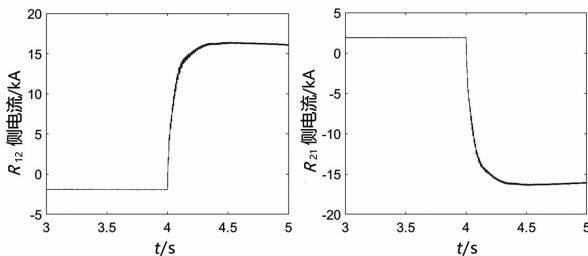


图 13 发生区外双极接地故障 f_4 后 l_1 两端故障电流

表 7 区外双极接地故障仿真结果

T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	$k_L/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	S
4.005	4	-2.478 5	0.535 1	-0.495 7	0.107 0	-1

从图 13 和表 7 中能够得到:发生区外双极短路故障后,非故障线路两端的故障电流突变方向相反,相较于发生区外单极接地故障,其故障电流斜率更大,但根据保护方法仍能有效地区别出故障区域。

3.2.3 交流侧故障

如图 1 中 f_5 所示,以换流站 S_2 入口发生交流系统三相对地短路为例研究发生交流侧故障时,所提保护的動作情况。图 14 和表 8 分别为交流侧三相接地后线路 l_1 两端故障电流波形以及仿真结果。

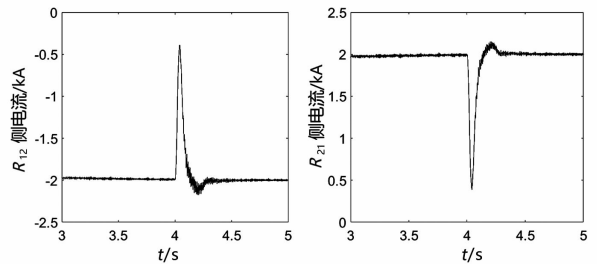


图 14 发生交流侧三相接地故障 f_5 后 l_1 两端故障电流

表 8 交流侧三相接地故障仿真结果

T_m/s	T_0/s	$\Delta I_R/kA$	$\Delta I_L/kA$	$k_R/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	$k_L/$ ($kA \cdot ms^{-1}$)	S
4.005	4	0.014 9	-0.031 2	0.002 9	-0.006 2	-1

从图 14 和表 8 中能够看出,当发生交流侧故障时,非故障线路两端故障电流突变方向相反,遵循所提出的保护方法,并且计算出 k_R 和 k_L 远小于于保护阈值 k_{set} ,因此在交流侧发生故障时,保护方法能够有效地区别出故障。

4 结 论

上面从柔性直流输电线路故障判别和保护方案几个方面,简要分析了国内外柔性直流输电线路故障判别与保护方案的研究现状。通过理论分析,发现当故障发生在保护区域外时,线路两端的故障电流突变方向是相反的,而发生内部故障时,线路两端的故障电流突变方向是相同的。基于这一发现,提出了一种基于电流斜率的纵联保护方法。大量仿真结果表明,该保护方案能够有效地区分保护区内、区外的故障,并且在有一定过渡电阻存在的条件下也

能够准确地判别出故障。同时,这种保护方法简单并且易于实现。但对于过渡电阻较大的故障,由于故障电流上升速度与幅值均减小,可能导致保护不能有效识别故障,可靠性较低,并且对于非故障雷击等大扰动,保护可能误动。针对这些问题,可以考虑引入行波原理以及小波变换等信号处理手段,即使有较大的过渡电阻存在时,也能够通过检测电流行波奇异值进行故障识别。关于抗干扰问题还需要未来进行更多研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):158-167.
- [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] 邹贵彬,高厚磊. 输电线路行波保护原理与研究现状[J]. 继电器,2007(20):1-6.
- [5] 王磊. 柔性直流输电线路继电保护原理研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [6] HengXu Ha, Yang Yu, RuiPeng Yi, et al. Novel scheme of travelling wave based differential protection for bipolar HVDC transmission lines[C]. 2010 International Conference on Power System Technology, 2010:1-6.
- [7] 韩屋仑,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.
- [8] 白嘉,徐玉琴,田彬,等. 基于形态综合算法的行波差动保护方案[J]. 电网技术,2006,30(9):98-102.
- [9] X F Jin, G B Song, Z B Ma. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on parameter identification[C]. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014:1-6.
- [10] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术,2014,38(5):1402-1407.
- 作者简介:**
刘景睿(1998),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;
邹贵彬(1971),男,博士,教授,博士生导师,从事继电保护的教学和研究工作。
- (收稿日期:2021-05-08)
-
- (上接第 10 页)
- [2] 郭征. 特高压长线路分相电流差动保护新原理[D]. 天津:天津大学,2004.
- [3] 李斌,贺家李,杨洪平,等. 特高压长线路距离保护算法改进[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):43-46.
- [4] 李斌,贺家李,常文华,等. 基于贝瑞隆模型的长线路距离保护[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):52-55.
- [5] 刘凯. 超/特高压线路差动保护电容电流补偿方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):94-97.
- [6] 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):30-32.
- [7] 侯俊杰,宋国兵,常仲学,等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理[J]. 电力自动化设备,2019,29(9):11-19.
- [8] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 基于特定频率电流波形特征的高压直流线路故障判别方法[J]. 电工技术学报,2017,32(1):20-31.
- [9] 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.
- [10] 李孝林. 准东-华东±1100 kV 特高压直流输电线路工程甘肃北段导线选型分析[J]. 内蒙古电力技术,2016,34(1):25-31.
- [11] 刘泽洪,郭贤珊,乐波,等. 1100 kV/12 000 MW 特高压直流输电工程成套设计研究[J]. 电网技术,2018,42(4):1023-1031.
- [12] 王强,包维瀚,余波,等. ±1100 kV 换流站直流场防雷设计研究[J]. 四川电力技术,2018,41(4):44-48.
- [13] 李小鹏,戴文睿,林圣,等. 基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法[J]. 四川电力技术,2020,43(2):33-35.
- 作者简介:**
单节杉(1979),男,硕士,讲师,主要研究方向为电力系统新型继电保护与控制。
- (收稿日期:2021-07-08)