

# 高压直流输电线路微分欠压保护特征量 动态特性分析与整定

韩昆仑<sup>1</sup>, 蔡泽祥<sup>1</sup>, 徐敏<sup>1</sup>, 贺智<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 典型的微分欠压保护有电压变化率( $du/dt$ )和低电压水平( $|u_{dl}|$ )2个特征量。分析表明: $du/dt$ 对故障的响应受直流控制系统的影响很小,而 $|u_{dl}|$ 对故障的响应是直流控制系统对故障进行调整的结果; $du/dt$ 对于发生在两极线路上的故障的响应明显大于对于其他区外故障的响应, $|u_{dl}|$ 对发生在本极和对极线路上的故障的响应有明显差异。分析了微分欠压保护的逻辑和功能,以及它和其他保护之间的配合关系。最后给出了微分欠压保护的整定方法,并借助 EMTDC 软件对整定方法进行了算例验证。

**关键词:** 电力系统保护; 微分欠压保护; 高压直流输电; 特征量; 动态特性

**中图分类号:** TM 773

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.020

## 0 引言

直流线路在直流输电系统中具有举足轻重的地位<sup>[1-4]</sup>,现有直流输电线路保护在以行波保护为主保护的基础上采用微分欠压保护作为其后备保护,以进一步提高直流线路保护的可靠性<sup>[5-7]</sup>。

高压直流输电系统中电气量的变化受直流控制系统作用影响显著<sup>[8-9]</sup>,因而相关电气量的响应特性,特别是故障条件下,与交流系统相比具有很大的差异;同时直流线路微分欠压保护作为直流输电线路的后备保护,具有一定的延时动作时间,因而与直流线路的主保护(行波保护)相比,其在故障条件下的响应也有很大不同。由于在附加控制系统作用的故障条件下,难以采用解析化的手段对直流线路电气量的传播特性进行研究,因此微分欠压保护的整定缺乏系统、有效的方法。实际直流系统中广泛采用的微分欠压保护均由厂家推荐定值,运行部门依据运行经验对定值进行适当调整后投入使用<sup>[10-15]</sup>。对于微分欠压保护中各判据的功能、参数计算的依据以及控制对保护判据的影响等均缺乏深入的认识。另一方面,当前对直流线路保护的研究多集中于新原理及方法<sup>[16-19]</sup>,受相关条件的限制暂难以推广应用。因此非常有必要对微分欠压保护的整定计算方法进行深入研究。

本文从微分欠压保护中各特征量在不同故障类型下的动态特性入手,分析了直流控制系统对保护特征量动态响应的影响、保护中各特征量在不同故障条件下动态响应的规律性,研究了保护中各判据的

功能及边界条件。本文还分析了微分欠压保护作为后备保护,在动作延时上与其他相关保护间的配合关系,在此基础上提出了微分欠压保护的整定计算方法。通过采用实际直流线路参数的整定算例验证了提出的整定计算方法具有良好的可靠性及灵敏性。本文方法能为现有直流线路相关保护的整定计算提供依据,具有重要的理论与实际价值。

## 1 直流线路微分欠压保护的保护区及相关故障类型

直流输电系统的两极线路在整流侧均配有微分欠压保护,其保护区为本极直流线路的全长,对极线路、线路两侧的末端设备(平波电抗器、直流滤波器等)、换流器以及交流系统均属于区外的范围。

以正极线路上的保护为例,进行保护整定研究需要考虑到的各类故障的分布如图1所示,关于各类故障的具体描述如表1所示。

对两极线路上的故障,主要研究各特征量随故障点位置变化所呈现的规律及相互间的关系;对其他位置的故障,则重点研究故障时各特征量的响应与区内故障时其响应间的关系。因此,各特征量在故

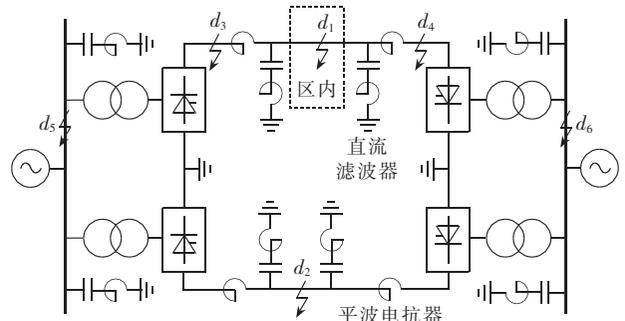


图1 直流输电系统结构图

Fig.1 Structure of HVDC transmission system

收稿日期:2013-04-18;修回日期:2013-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077055);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100172110031)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077055) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20100172110031)

表 1 各类型故障  
Tab.1 Different fault types

故障点	故障位置	故障描述
$d_1$	区内	本极线路上不同位置发生的接地故障
$d_2$	区外	对极线路上不同位置发生的接地故障
$d_3$	区外	本极线路整流侧平波电抗器阀侧的接地故障
$d_4$	区外	本极线路逆变侧平波电抗器阀侧的接地故障
$d_5$	区外	整流侧交流母线三相短路故障
$d_6$	区外	逆变侧交流母线三相短路故障

障时的动态特性分析是保护整定研究的重要基础。

现以一实际高压直流输电系统的线路参数为基础进行正极线路微分欠压保护特征量的动态特性分析。线路相关参数如下:双极额定传输功率为 1 800 MW,额定电压为 500 kV,额定电流为 1.8 kA,直流输电线路长度为 960 km。

## 2 直流线路微分欠压保护特征量动态特性

### 2.1 直流线路微分欠压保护的表征量

微分欠压保护作为直流线路行波保护的后备保护,配置于直流输电线路整流侧的两极线路上,当直流线路行波保护拒动或退出运行时,其可作为检测直流线路故障的主要保护。微分欠压保护动作后,出口信号会启动直流线路再启动逻辑 DFRS (DC Line Fault Recovery Sequence),若再启动次数超过预设的次数则闭锁该极<sup>[20]</sup>。

典型的直流线路微分欠压保护的动作为:

$$\begin{cases} du/dt > k_1 \\ |u_{dl}| < k_2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,典型的直流线路微分欠压保护主要包含 2 个特征量:电压变化率  $du/dt$ ,其构成的判据称为微分判据;线路低电压水平  $|u_{dl}|$ ,其构成的判据称为低电压判据。电压变化率  $du/dt$  与行波保护中该特征量的构成原理、计算方法及定值等均相同,可参见文献<sup>[21]</sup>。此外,作为后备保护的微分欠压保护还具有保护动作延时  $t$ 。

### 2.2 控制系统对微分欠压保护特征量的影响

与传统的交流输电系统相比,直流系统的复杂之处在于其是在控制系统作用下运行的,故障条件下电气量的变化受控制系统影响显著。同时,微分欠压保护作为后备保护,其本身也具有一定的延时动作时间。因此研究微分欠压保护需要考虑故障发生后控制系统对电气量以及保护特征量变化的影响。

电压变化率  $du/dt$  主要用于检测线路末端的电压波动情况,可判断故障行波是否到达保护安装处。故障条件下  $du/dt$ (标么值)与控制系统的响应情况如图 2 所示,图中  $\alpha$  为直流输电系统换流器中晶闸管的触发延迟角。

从图 2 可知,故障发生后,电压变化率  $du/dt$  与

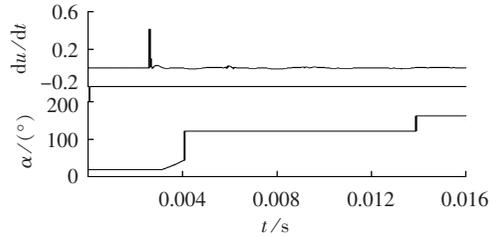


图 2 故障条件下  $du/dt$  与直流控制系统的响应情况

Fig.2 Responses of  $du/dt$  and DC control system to fault

控制系统相比具有更快的响应速度,这是由于  $du/dt$  的响应时间主要取决于其内部各计算模块的固有时间和,而控制系统的各环节中除模块本身的固有时间和外,一般还设有一定的惯性时间常数以保证控制系统具有稳定的控制效果。由此,微分欠压保护中的电压变化率  $du/dt$  对各类故障及扰动的响应主要取决于其算法本身,受控制系统影响很小。

线路低电压水平  $|u_{dl}|$  通过检测一段时间内线路电压水平的变化以判断系统的运行状态。故障条件下线路低电压水平  $|u_{dl}|$ (标么值)的变化情况如图 3 所示。

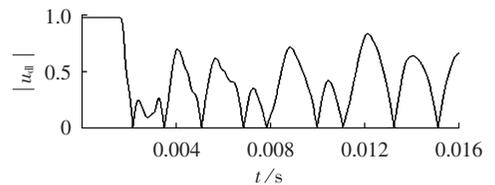


图 3 故障条件下  $|u_{dl}|$  的响应情况

Fig.3 Response of  $|u_{dl}|$  to fault

对比图 2 与图 3 可以看出,  $|u_{dl}|$  在故障条件下的响应与  $du/dt$  不同,是一个持续波动和调整的过程。为完整获取  $|u_{dl}|$  在故障条件下的动态特征,需要对其在较长的时间内进行检测,而控制系统在这一阶段已经开始发挥显著的作用。因此,故障条件下线路低电压水平  $|u_{dl}|$  的动态响应是控制系统对故障进行调整的结果。

### 2.3 直流线路微分欠压保护特征量的动态特性

#### 2.3.1 电压变化率 $du/dt$ 的动态特性

微分欠压保护中电压变化率  $du/dt$  与直流线路行波保护采用了相同的构成原理、计算方法及定值,因此关于其动态特性的分析可参考文献<sup>[21]</sup>,本文中仅给出相关的结论: $du/dt$  对两极线路上的故障(故障点  $d_1$  和  $d_2$ )的响应程度明显大于其对其他区外故障(故障点  $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$ 、 $d_6$ )的响应程度。

#### 2.3.2 线路低电压水平 $|u_{dl}|$ 的动态特性

线路低电压水平  $|u_{dl}|$ (标么值)在不同类型的故障条件下的动态响应情况如图 4 所示。

图 4(a)为本极与对极线路上距整流侧 20% 线路全长处(图 1 中的点  $d_1$  和  $d_2$ )分别发生故障时,本极线路低电压水平  $|u_{dl}|$  的响应情况。当本极线路故

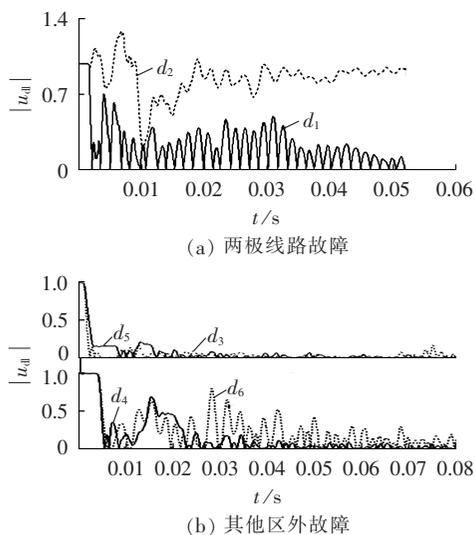


图 4 不同故障条件下  $|u_{ul}|$  的响应情况  
Fig.4 Responses of  $|u_{ul}|$  to different faults

障时,  $|u_{ul}|$  发生大幅度跌落且维持在很低的电压水平, 在故障发生初期电压波动幅度较大, 而在后续的时段内电压波动幅度减小; 对极线路上发生故障时, 本极线路低电压水平  $|u_{ul}|$  也发生明显的波动, 但与本极线路发生故障时相比, 其幅度明显减小, 这主要是由于本极线路故障时, 线路电压受到故障中的线模和地模分量的共同影响, 而对极线路故障时本极线路电压仅受其中线模分量的影响。另外还可看出对极线路故障时, 电压发生波动后在控制系统的作用下能够逐渐恢复到正常水平。对比图 4(a) 中的 2 条曲线, 在两极线路发生故障的初期,  $|u_{ul}|$  的波动均较为剧烈, 此时段内其动态响应难以进行可靠的区分。

图 4(b) 为其他区外位置(故障点  $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$ 、 $d_6$ ) 发生故障时, 本极线路低电压水平  $|u_{ul}|$  的响应情况。与图 4(a) 对比可见, 此类故障条件下  $|u_{ul}|$  的动态响应与本极线路上发生故障时非常接近。

考虑到两极线路发生故障初期, 本极线路低电压水平  $|u_{ul}|$  对故障的动态响应难以可靠区分, 因而需要采用附加条件将此时段躲开, 排除其对  $|u_{ul}|$  带来的影响。对两极线路故障条件下本极线路电压  $u_{ul}$  (标么值) 的变化进行进一步分析, 其变化情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 本极线路故障的初期, 线路电

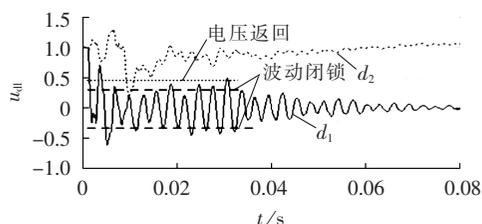


图 5 两极线路故障时  $|u_{ul}|$  的变化  
Fig.5 Variation of  $|u_{ul}|$  responding to faults of two polar lines

压  $u_{ul}$  剧烈波动并伴随着极性的反复更替; 而对极线路故障的初期, 本极线路电压  $u_{ul}$  短时跌落后, 即在控制系统作用下逐渐恢复正常水平。依据此特征, 考虑在故障初期对微分欠压保护采用附加条件进行闭锁, 即躲开该时段造成的影响, 以后续的动态响应进行判据的整定计算。闭锁保护的条件包括以下 2 种。

**a. 波动闭锁条件。** 设定电压  $u_{ul}$  波动的上、下限, 当电压波动幅度超出此范围时触发闭锁信号, 以躲开此阶段。

**b. 电压返回条件。** 设定电压  $u_{ul}$  的返回值, 当电压高于此值时触发闭锁信号, 此信号还可以使保护免受系统运行中的暂态扰动的影响。

在前文分析的基础上, 对发生于本极及对极线路上不同位置的故障进行分析, 同时考虑上述闭锁判据后, 得到了两极线路故障条件下本极线路低电压水平  $|u_{ul}|$  (标么值) 随故障位置变化的动态特性曲线, 如图 6 所示, 图中  $p$  为故障点与整流侧的距离与线路全长的百分比。

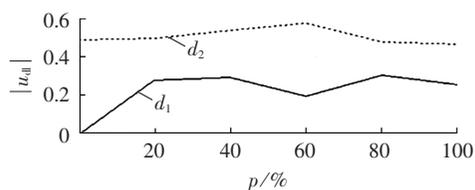
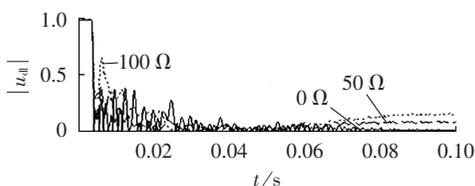


图 6 两极线路不同位置发生故障时  $|u_{ul}|$  的变化趋势  
Fig.6 Variation of  $|u_{ul}|$  responding to fault of two polar lines for different fault locations

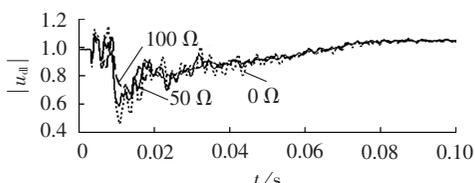
由图 6 可以看出, 在躲开故障初期的波动后,  $|u_{ul}|$  在两极线路上发生故障时的动态特性具有显著的差异性。

### 2.3.3 过渡电阻对保护特征量动态特性的影响

一般情况下故障点处会存在一定数值的过渡电阻, 对保护特征量造成一定的影响。以线路低电压水平  $|u_{ul}|$  (标么值) 为例分析过渡电阻对保护特征量的影响, 如图 7 所示。



(a) 本极线路故障



(b) 对极线路故障

图 7 过渡电阻对  $|u_{ul}|$  的影响

Fig.7 Influence of transition resistance on  $|u_{ul}|$

图 7(a)、(b)分别为本极与对极线路上距整流侧 50% 线路全长处发生故障时,本极线路低电压水平  $|u_{dl}|$  的响应情况。可以看出,过渡电阻值对  $|u_{dl}|$  的响应程度有一定的影响,从而影响保护特征量的灵敏度;但  $|u_{dl}|$  在区内与区外故障下响应的趋势则不受过渡电阻影响。因此在进行保护整定时要留有适当的裕度以适应一定程度过渡电阻的影响。

### 3 直流线路微分欠压保护逻辑与功能分析

在分析了直流线路微分欠压保护各特征量动态特性的基础上,对各判据的功能及相互间的逻辑关系进行进一步分析。直流线路微分欠压保护各判据间的基本逻辑关系如图 8 所示。

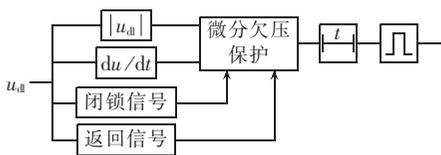


图 8 直流线路微分欠压保护逻辑图

Fig.8 Logic diagram of differential under-voltage protection

电压变化率  $du/dt$  能够将两极线路上的故障与线路故障以外的各类区外故障可靠地区分开。因此,由电压变化率  $du/dt$  所构成的保护判据的主要功能为判别故障是否发生在输电线路路上。

线路低电压水平  $|u_{dl}|$  在躲开故障初期的电压波动后,能够将对极线路发生的故障与本极线路发生的故障区分开。因此,由线路低电压水平  $|u_{dl}|$  所构成的保护判据的主要功能为判别故障发生于本极线路路上还是对极线路上,即具有选极的功能。

闭锁信号及返回信号相互配合,用以辅助低电压判据躲开故障初期电压的剧烈波动带来的影响,同时还能使保护免受直流系统运行中非故障扰动的影响。

### 4 直流线路微分欠压保护的整定计算

通过对直流线路微分欠压保护中各特征量的动态特性进行研究,分析了微分欠压保护各判据所具有的功能,在此基础上得到的直流线路微分欠压保护整定的基本方法如下。

**a.** 电压变化率  $du/dt$  判据的整定应躲开除线路故障以外的各种区外故障,即分别躲开平波电抗器阀侧故障、交流系统母线三相短路故障时特征量  $du/dt$  的响应值<sup>[21]</sup>,可按式(2)进行整定计算,可按式(3)进行灵敏性校验。为便于表达,令  $\lambda = du/dt$ 。

$$\lambda_{set} = K_{rel} \lambda_{max} \quad (2)$$

$$K'_{sen} = \lambda_{min} / \lambda_{set} \quad (3)$$

其中,  $\lambda_{set}$  为电压变化率的整定值;  $\lambda_{min}$  为本极线路故障时电压变化率可能出现的最小值;  $\lambda_{max}$  为需要躲开

的各种区外故障条件下电压变化率的最大值;  $K_{rel}$  为可靠系数,主要考虑计算误差、裕度等因素的影响;灵敏度系数  $K'_{sen}$  一般不小于 1.3。

**b.** 线路低电压水平  $|u_{dl}|$  判据的整定应在采用电压波动闭锁条件与电压返回条件,配合其躲开故障初期电压波动影响的基础上,躲开对极线路上不同位置发生故障时  $|u_{dl}|$  可能出现的最小值,可按式(4)进行整定计算,可按式(5)进行灵敏性校验。

$$|u_{dl}|_{set} = K'_{rel} |u_{dl}|_{min} \quad (4)$$

$$K'_{sen} = |u_{dl}|_{set} / |u_{dl}|_{max} \quad (5)$$

其中,  $|u_{dl}|_{set}$  为线路低电压水平的整定值;  $|u_{dl}|_{min}$  为对极线路故障时躲开故障初期电压波动后  $|u_{dl}|$  可能出现的最小值;  $|u_{dl}|_{max}$  为本极线路故障时躲开故障初期电压波动后  $|u_{dl}|$  可能出现的最大值;  $K_{rel}$  为可靠系数,主要考虑计算误差、裕度等因素的影响,作为欠量保护判据,其取值应小于 1;灵敏度系数  $K'_{sen}$  一般不小于 1.3。

**c.** 由于直流输电线路微分欠压保护为后备保护,因此其具有保护延时  $t$ 。延时定值主要从以下两方面考虑。

① 与直流线路行波保护及直流线路纵差保护进行配合,延时应长于行波保护的固有动作时间而短于直流线路纵差保护的延时。

② 与直流过流保护进行配合。线路故障发生时,线路电流突增后在控制系统的作用下迅速减小,突增的电流可能启动换流器区的直流过流保护。直流过流保护通常采用具有反时限特性的多段定值设置,因而微分欠压保护的延时应短于直流线路故障可能引起的线路电流突增最大值在直流过流保护中对应段的延时,即微分欠压保护的延时应同时满足:

$$\begin{cases} t_{int} < t < t_{dcll} \\ t < t_{doc} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $t_{int}$  为行波保护固有动作时间;  $t_{dcll}$  为纵差保护延时;  $t_{doc}$  为线路故障引起线路电流突增的最大值在直流过流保护中对应段的延时。综合考虑保护间的配合关系,延时  $t$  可设为 20~100 ms,考虑适当的裕度,则延时  $t$  可设为 90 ms。

### 5 基于 EMTDC 仿真的直流线路微分欠压保护整定算例

依据直流输电线路微分欠压保护的整定计算方法,本文结合一实际直流系统的参数(具体见第 1 节)进行整定计算,微分欠压保护的采样频率使用其实际值 6 kHz。在本算例中:电压变化率  $du/dt$  的可靠系数取 1.1;低电压水平  $|u_{dl}|$  的可靠系数取 0.75,其波动闭锁限值取 0.2 p.u.,电压返回限值取 0.45 p.u.。

**a.** 电压变化率  $du/dt$  的整定。

该判据整定计算所需的基本数据是根据其动态特性分析的结论(参见第2.3.1节及第4节),在仿真模型上设置所需的故障条件,然后进行故障仿真计算而得到的。 $du/dt$ 在各种故障类型下用于整定计算的响应值(标么值)如表2所示。

表2  $du/dt$  整定计算数据  
Tab.2 Setting calculation data of  $du/dt$

故障点	故障位置	$du/dt$ 响应值
$d_1$	区内	0.277
$d_3$	区外	0.167
$d_4$	区外	0.152
$d_5$	区外	0.087
$d_6$	区外	0.105

$$\lambda_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \lambda_{\text{max}} = 1.1 \times 0.167 \approx 0.184$$

$$K_{\text{sen}} = \frac{\lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{set}}} = \frac{0.277}{0.184} \approx 1.5$$

### b. 线路低电压水平 $|u_{\text{dl}}|$ 的整定。

$|u_{\text{dl}}|$ 在各种故障类型下用于整定计算的响应值(标么值)如表3所示。

表3  $|u_{\text{dl}}|$  整定计算数据  
Tab.3 Settings calculation data of  $|u_{\text{dl}}|$

故障点	故障位置	$ u_{\text{dl}} $ 响应值
$d_1$	区内	0.253
$d_2$	区外	0.528

$$|u_{\text{dl}}|_{\text{set}} = K_{\text{rel}} |u_{\text{dl}}|_{\text{min}} = 0.6 \times 0.528 \approx 0.317$$

$$K_{\text{sen}} = \frac{|u_{\text{dl}}|_{\text{set}}}{|u_{\text{dl}}|_{\text{max}}} = \frac{0.317}{0.253} \approx 1.3$$

## 6 结论

进行保护整定计算研究的基础是微分欠压保护中各保护特征量在不同故障类型下的动态特性,本文提出的直流输电线路微分欠压保护的整定计算方法是对直流线路保护整定工作的进一步补充和完善,其与直流线路行波保护整定方法构成有机的整体,使直流线路保护整定工作更具层次性,对直流输电线路保护可靠性的进一步提升具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 丁钊,韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术,2003,27(9):49-54.  
DING Zhao,HAN Weiqiang. Summary of bipolar operation situation of Tian-Guang DC power transmission system[J]. Power System Technology,2003,27(9):49-54.
- [3] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术,2006,32(9):173-176.

- REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):173-176.
- [4] 刘永浩,蔡泽祥,徐敏,等. 基于波速优化与模量传输时间差的直流线路单端行波测距新算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):72-76.  
LIU Yonghao,CAI Zexiang,XU Min,et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):72-76.
- [5] 邓本飞. 天广高压直流输电线路保护系统综述[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(19):71-74.  
DENG Benfei. HVDC line protection summary of Tian-Guang project[J]. Power System Protection and Control,2008,36(19):71-74.
- [6] 周翔胜,林睿. 高压直流输电线路保护动作分析及校验方法[J]. 高电压技术,2006,32(9):33-37.  
ZHOU Xiangsheng,LIN Rui. Analysis of relay protection action for HVDC line and testing method[J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):33-37.
- [7] 束洪春,田鑫萃,董俊,等.  $\pm 800$  kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(11):179-188.  
SHU Hongchun,TIAN Xincui,DONG Jun,et al. Simulation and analysis for Yun-Guang  $\pm 800$  kV HVDC Transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(11):179-188.
- [8] 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.
- [9] 傅闯. 高压直流输电控制保护系统新技术——WIN-TDC[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):72-77.  
FU Chuang. Technologies in HVDC control and protection system WIN-TDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):72-77.
- [10] 陈锡磊,朱韬析,周浩. 高压直流线路低电压保护判据定值调整研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):125-130.  
CHEN Xilei,ZHU Taoxi,ZHOU Hao. Research on adjustment of criterion settings of DC line under-voltage protection[J]. Power System Protection and Control,2011,39(9):125-130.
- [11] 田庆. 天广直流系统双极线路保护误动作分析[J]. 南方电网技术,2011,5(5):26-29.  
TIAN Qing. Analysis on the fault trip of bipolar DC line protection in Tianshengqiao-Guangzhou HVDC system[J]. Southern Power System Technology,2011,5(5):26-29.
- [12] 朱韬析,彭武. 天广直流输电系统线路高阻接地故障研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):137-140.  
ZHU Taoxi,PENG Wu. Research on high impedance earth fault of Tian-Guang HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control,2009,37(23):137-140.
- [13] 朱韬析,欧开健. 高压直流输电线路高阻接地故障与后备保护[J]. 电力建设,2010,31(4):21-24.  
ZHU Taoxi,OU Kaijian. High-impedance ground faults of HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction,2010,31(4):21-24.
- [14] 田庆. 天广工程直流线路突变量保护误动作分析[J]. 高压电器,2012,48(4):33-38.  
TIAN Qing. Analysis on the fault trip of bipole DC line pro-

- tection in Tianguang HVDC[J]. High Voltage Apparatus,2012, 48(4):33-38.
- [15] 朱韬析,候元文,王超,等. 直流输电系统单极金属回线运行方式下线路接地故障及保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(20):133-138.
- ZHU Taoxi,HOU Yuanwen,WANG Chao,et al. Research on the line faults and its protection of HVDC transmission system in metallic return operation[J]. Power System Protection and Control,2009,37(20):133-138.
- [16] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):45-49.
- GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(9):45-49.
- [17] 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):109-117.
- SHU Hongchun,LIU Kezhen,ZHU Shengqiang,et al.  $\pm 800$  kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(31):109-117.
- [18] 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.
- [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] 王海军,吕鹏飞,曾南超,等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启功能研究[J]. 电网技术,2006,30(23):32-35.
- WANG Haijun,LÜ Pengfei,ZENG Nanchao,et al. Research on DC line fault recovery sequence of Guizhou-Guangdong HVDC project[J]. Power System Technology,2006,30(23):32-35.
- [21] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术,2013,37(1):255-260.
- HAN Kunlun,CAI Zexiang,XU Min,et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of traveling wave protection for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology,2013,37(1):255-260.

#### 作者简介:



韩昆仑

韩昆仑(1978-),男,河北张家口人,博士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化(E-mail:hkl1st@163.com);

蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制;

徐敏(1988-),男,江苏淮安人,博士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化;

贺智(1978-),男,湖南邵阳人,工程师,研究方向为高压直流输电系统技术管理。

## Dynamic characteristic analysis and setting of characteristic parameters of differential under-voltage protection for HVDC transmission line

HAN Kunlun<sup>1</sup>,CAI Zexiang<sup>1</sup>,XU Min<sup>1</sup>,HE Zhi<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Typical differential under-voltage protection has two characteristic parameters: the variation rate of voltage ( $du/dt$ ) and the low voltage level of HVDC transmission line ( $|u_{dl}|$ ). Analysis shows: the response of  $du/dt$  to faults is slightly influenced by DC control system while that of  $|u_{dl}|$  is the adjustment result of DC control system against faults;  $du/dt$  responses to the faults of two polar lines more obviously than other out-zone faults, and  $|u_{dl}|$  responses to the faults of own and opposite polar lines quite differently. The logic and function of differential under-voltage protection are analyzed, as well as its coordination with other relay protections. The method for its setting is given and verified by a case study with EMTDC.

**Key words:** electric power system protection; differential under-voltage protection; HVDC power transmission; characteristic parameter; dynamic characteristics