

考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究

刘 剑, 范春菊, 邝能灵

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 在考虑直流控制系统影响的情况下, 详细分析了 HVDC 输电线路区内、区外的故障特征以及直流控制系统的动作特性和控制状态。引入并分析了基于开关函数的交直流系统二次谐波计算等值模型。通过分析故障期间换流器触发角和直流侧二次谐波量的变化特征, 提出了一种新的以换流器触发角为保护动作量, 利用二次谐波分量闭锁的直流线路后备保护方案, 给出了保护整定的理论计算方法。与直流线路纵联差动保护相比, 该保护不因直流电流波动影响而被闭锁, 保护动作时间较快; 与微分欠压保护相比, 具有更高的抗过渡电阻能力。通过 PSCAD/EMTDC 大量仿真计算, 验证了该保护能可靠区分直流线路区内、区外故障, 与直流线路纵联差动保护和微分欠压保护相比具有明显的优越性。

关键词: HVDC 输电线路; 直流控制系统; 后备保护; 换流器; 触发角

Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system

LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The fault characteristic and the states of DC control system during HVDC transmission line inner and external fault are analyzed in detail considering the influence of DC control system. An equivalent circuit of second-order harmonic based on switch function theory is introduced and analyzed. A new backup protection scheme for DC transmission line is proposed by analyzing the feature of converter firing angle and second-order harmonic in failure period. Converter firing angle is used as operating value and second-order harmonic is used as blocking signal for the backup protection. In addition, theoretical calculation method for the protection settings is provided. Compared with DC line differential protection, the proposed protection can operate with higher speed and will be independent of DC current fluctuations. Compared with derivative under-voltage protection, it can operate well during much higher resistance ground fault. Comprehensive simulation using PSCAD/EMTDC validates that the presented protection scheme can identify inner and external fault reliably and rapidly, and has obvious advantages over DC line differential protection and derivative under-voltage protection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377104).

Key words: HVDC transmission line; DC control system; backup protection; converter; firing angle

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0073-08

0 引言

与交流输电技术相比, 高压直流(HVDC)输电由于具有输送距离远、输送容量大以及功率调控方便等诸多优点, 而被广泛应用于远距离电能传输、异步联网、海岛供电等领域^[1-4]。HVDC 输电线路常作为大区域联网的联络线, 它运行的可靠性不仅影响着直流输电系统, 也关系到两端交流系统的稳定。然而运行数据显示国内直流输电可靠性指标偏低^[5], 线

路故障占直流输电系统故障的 50%, 但线路保护的 正确动作率只有 50%, 有近一半的输电线路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^[6]。从国内外投运的 HVDC 输电工程来看, 直流输电线路保护存在着理论不完备、没有系统地考虑控制系统的影响, 且没有普遍适用的整定原则、仅依赖于仿真结果进行整定等问题^[7], 因而可靠性不高。

目前直流线路主保护配置行波保护, 微分欠压保护、纵联差动保护作为行波保护的后备保护^[8]。行波保护与微分欠压保护都存在耐过渡电阻能力

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51377104)

差、灵敏度低、整定缺乏依据(需要通过仿真试验整定)等问题。微分欠压保护在行波保护退出运行或者由于电压变化率上升沿宽度不足时可以起到后备保护作用,然而在过渡电阻较大时,电压变化率不足而失去后备保护的作用^[9]。电流纵联差动保护由于没有考虑暂态分布电容的影响,需等待暂态过程完全消失后才能动作,加上躲开区外故障的延时,动作时间长达 1.1 s,此时整流侧极控中的低压保护或者最大触发角保护动作将故障极闭锁^[10-11],因此差动保护也没有对高阻接地故障起到后备作用。有关直流线路后备保护的研究较少,文献[12]通过大量的仿真提出了直流线路远后备保护方案,但其无法区分直流线路区外故障,保护定值的获得依靠仿真,且配合时间较长。文献[10]从保护配置的角度还指出直流线路保护种类单一,可靠性差,在直流线路故障后相当长时段内缺乏能够反应故障的保护原理。因此有必要研究可靠性更高、具有理论整定依据、动作时间较快的直流线路后备保护。

本文结合交直流系统二次谐波等值模型,考虑直流控制系统动作的影响,详细分析了直流线路区内外故障时交直流两侧电气量的特征以及控制系统的控制状态,提取交直流侧的特征电气量和控制系统状态量构造了一种直流线路后备保护方案,同时基于二次谐波等值电路给出了相关判据的整定计算方法,并通过仿真验证表明该保护方案能准确区分直流线路区内、区外故障,并具有较高的抗过渡电阻能力。

1 高压直流输电系统与二次谐波计算模型

典型两端直流输电系统主要由整流站、逆变站和直流线路构成,其构成如图 1 所示。

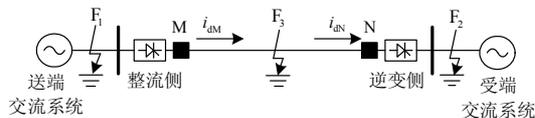


图 1 典型两端直流输电系统

Fig. 1 Typical two-terminal HVDC transmission system

引入开关函数方法对图 1 系统进行建模^[13],考虑整流侧交流系统不对称情况下,交直流系统二次谐波等值电路如图 2 所示^[14]。

图中: L_{dr} 、 L_{di} 为平波电抗器等值电感; R_d 为直流线路电阻; C_d 为直流线路等值电容; $L_{ceq} = (4 - \frac{3\mu}{\pi})L_i$ 为换流器等值电感,式中 L_i 为换相电感;

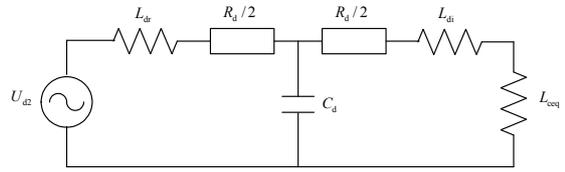


图 2 二次谐波等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of second-order harmonic

$U_{d2} = \frac{3U_{A-}}{2}(A_1 + A_{-1})\cos(2\omega t + \varphi_{A-})$ 为 M 端二次谐

波等值电压,式中 $A_k = \frac{4}{\pi} \frac{1}{k} \sin \frac{k\pi}{2} \cos \frac{k\pi}{6} (k = \pm 1)$,

φ_{A-} 为换流母线负序电压相位。于是 M 处二次谐波电流可由式(1)得出。

$$I_{d2} = \frac{U_{d2}}{Z_{d2}} \quad (1)$$

式中, Z_{d2} 为二次谐波等值阻抗。

由 U_{d2} 表达式可知交流侧负序电压将在直流侧产生 2 次谐波电压,且与负序分量成正比;而当交流系统对称时,直流侧无 2 次谐波分量。因此直流侧的 2 次谐波电气量可以作为直流线路区外不对称故障的一个重要判据。逆变侧的数学模型与整流侧相似,在此不予重复。

2 直流线路区内、区外故障分析

直流控制系统对直流线路运行状态的变化具有快速的反应能力,交直流系统发生故障的暂态过程中,整流侧和逆变侧的控制模式都发生了多次切换^[15]。直流线路发生区内、区外故障时,故障特征不再单一,且随控制系统的变化而变化。考虑到本文研究的为直流线路的后备保护,故将对直流控制系统的最终控制状态和故障特征进行分析。

图 3 为控制系统状态特性图^[16]。本文采用仿真验证系统为国际大电网会议(CIGRE)直流输电标准测试系统,对于一般交流直流混联系统,送端与受端都为有源系统,与直流系统相连的两端交流系统可用等值电源等效替代,因此,本仿真系统适用于直流连接的交直流混联系统。该测试系统的基本控制方式是:整流侧由定电流控制和定 α_{min} (最小触发角)控制两部分组成;逆变侧配有定电流控制和定关断角 γ_0 控制,但无定电压控制。此外整流侧和逆变侧都配有低压限流(VDCOL)控制,逆变侧还配有电流偏差控制^[17]。

2.1 区外整流端交流侧短路故障

整流端交流侧发生短路故障如图 1 中 F_1 所示。当发生三相对称故障时,整流侧在定电流控制作用

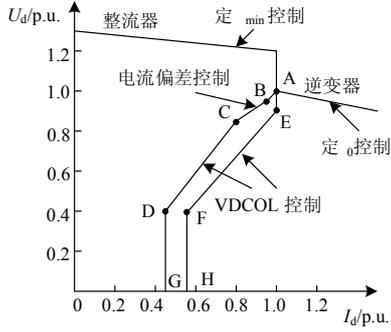


图3 两端直流输电系统直流控制器稳态 $U_d - I_d$ 特性曲线

Fig. 3 Steady-state $U_d - I_d$ characteristics for two-terminal HVDC system

下迅速将触发角 α 减少, 最终整流侧运行在定 $a_{\min} = 5^\circ$ (最小触发角) 控制状态; 逆变侧进入定电流 (最小电流限制) 控制状态, 如图3中曲线 DG 段; N 端直流电流恒定于 0.45 p.u.。此时, 交流系统仍保持对称, 由式(1)可知, 直流侧二次谐波分量为零。于是可知在区外整流端交流侧三相短路故障时, 有式(2)所示的故障特征。

$$\begin{cases} a_{r \min} = 5^\circ \\ I_{d2} = 0 \\ U_{d2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当整流端交流侧发生不对称短路故障时, 同样整流侧在定电流控制作用下触发角 α 减少, 整流侧最终运行在定 $a_{\min} = 5^\circ$ (最小触发角) 控制状态; 逆变侧运行在定电流控制状态, 如图3曲线 C-D 段。交流侧不对称故障产生负序电压分量, 由式(1)可知, 直流侧将产生 2 次谐波分量, 且交流网侧不对称故障越严重, 负序分量越大, 直流侧二次谐波电压越大, 结合式(1)即可计算出二次谐波电流。于是可知在区外整流端交流侧不对称短路故障时, 有式(3)所示的特征。

$$\begin{cases} a_{r \min} = 5^\circ \\ I_{d2} > I_{d20} \\ U_{d2} > U_{d20} \end{cases} \quad (3)$$

式中, I_{d20} 、 U_{d20} 分别为考虑系统干扰和不平衡情况下直流侧二次谐波电流、电压值。

2.2 区外逆变端交流侧短路故障

逆变端交流侧发生短路故障(只考虑不导致换相失败的情况下), 如图1中 F_2 所示。当发生三相对称短路时, 逆变端换流母线电压极大地下降到接近

于零, 逆变器将发生换相失败, 其有相关的控制和保护将迅速动作。当逆变端交流侧发生不对称故障时, 在不引起换相失败的情况下, 换流母线电压有所下降, 整流侧在定电流控制作用下迅速将触发角 α 增大, 整流侧最终运行在低压限流(VDCOL)控制状态, 如图3中曲线 EF 段; 逆变侧控制系统运行在定 γ_0 控制状态。同样由于交流侧的不对称故障, 直流侧将有较大含量的二次谐波量, 其计算值可以结合式(1)得出。于是可知区外逆变端交流侧不对称短路故障时, 有如式(4)所示的特征。

$$\begin{cases} a > a_E \\ I_{d2} > I_{d20} \\ U_{d2} > U_{d20} \end{cases} \quad (4)$$

式中: a_E 为图3中 E 点对应的整流器触发角; I_{d20} 、 U_{d20} 分别为考虑系统干扰和不平衡情况下直流侧二次谐波电流、电压值。

2.3 直流线路区内短路故障

直流线路发生区内短路故障时, 如图1中 F_3 所示。直流线路对于稳态的直流电流阻抗效应小, M 端电压下降很大, 电流增大, 整流侧在定电流控制作用下迅速将 α 增大, 最终整流侧进入定电流(最小电流限制)控制状态, 即如图3中曲线 FH 段, 将 M 端直流电流限制在 0.55 p.u.。同样对于逆变侧而言, N 端直流电压下降较大, 逆变侧触发角增大, 控制系统最终进入定电流控制(最小电流限制)状态, 即图3中曲线 DG 段, 将 N 端直流电流限制在 0.45 p.u.。于是直流线路区内短路故障有如式(5)所示特征。

$$\begin{cases} a > a_E \\ I_{d2} = 0 \\ U_{d2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_E 为图3中 E 点对应的整流器触发角。

3 直流线路后备保护方案

综合区内、区外故障特征分析, 即式(2)~式(5)所示, 可利用 $a > a_{\text{set}}$ 作为后备保护动作判据, $I_{d2} > I_{d2,\text{set}}$ 、 $U_{d2} > U_{d2,\text{set}}$ 为闭锁判据, 形成后备保护方案。当满足 $a > a_{\text{set}}$, 且无闭锁信号时, 后备保护延时动作, 其他情况保护不动作。

3.1 保护定值整定和判据计算

系统额定运行时, 图1中 M 端直流电流和电压分别为 I_{dN} 、 U_{dN} , 并作为直流侧二次谐波分量的标幺值基准。当整流侧运行在图3中 E 点时, 直流侧电流和电压分别为 $I_{dE} = 1$ p.u.、 $U_{dE} = 0.9$ p.u.^[16], 于是计算 E 点触发角如式(6)。

$$\alpha_E = \arccos\left(\frac{U_{dE}}{N} + \frac{3}{\pi} X_{r1} I_{dE}\right) / 1.35 U_1 \quad (6)$$

式中: X_{r1} 为换相电抗; U_1 为换流母线线电压有效值, 对于 12 脉波换流器, $N = 2$ 。

结合式(2)~式(5)的分析, 考虑到实际系统故障时, 由于控制系统的调控作用和过渡电阻的时变性, 容易引起故障后短暂时间内触发角较大范围波动, 为防止保护误动作, 以触发角动作判据的计算如式(7)。

$$\begin{cases} |a(t+10 \text{ ms}) - a(t)| < 5^\circ \\ \alpha > \alpha_{\text{set}} = K_\alpha \alpha_E \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a(t)$ 为触发角采样值; K_α 为可靠系数; α_{set} 为保护门槛值。即从极控测量单元获取^[18]触发角的采样值 10 ms 内的差值小于 5° 且触发角大于门槛值时, 动作判据出口。正常运行时整流器触发角在 $5^\circ \sim 20^\circ$ ^[18], 而直流线路内部故障时, 整流侧控制系统运行在图 3 中 FH 段, 其触发角比在 E 点时大得多, 为保证可靠性 K_α 可取 1.5。

系统正常运行或者直流线区内故障时, 理想情况下直流侧二次谐波分量为零, 但为保证可靠性, 二次谐波分量定值取大于系统不平衡情况下以及区外三相故障暂态不平衡引起的直流侧二次谐波电流、电压值, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} I_{d2} > I_{d2.\text{set}} = K_2 I_{dN} \\ U_{d2} > U_{d2.\text{set}} = K_2 U_{dN} \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_2 为可靠系数; $I_{d2.\text{set}}$ 、 $U_{d2.\text{set}}$ 分别为二次谐波电流、电压门槛值。

由于本文研究的为直流线路的后备保护, 为方便计算二次谐波定值, 区外故障可只考虑最严重的区外不对称故障情形, 即换流母线处故障, 结合特定系统参数分别计算换流母线处单相或者两相接地短路的负序电压, 根据式(1)计算出直流侧二次谐波电流、电压量, 据此来确定 K_2 取值。结合本文仿真系统参数计算, K_2 可取 0.1。

3.2 后备保护方案

结合第 2 节的故障分析和式(6)~式(8), 形成直流线路后备保护算法流程图如图 4 所示。

需要说明的是: 为防止逆变侧区外故障导致换相失败^[19], 而满足判据门槛值, 引起后备保护误动作, 保护可以通过一定的延时等待换相失败诊断结果, 以进行配合规避。换相失败相关保护诊断时间约为 200 ms ^[18], 故障时直流控制系统的调控响应时间一般为 $5 \sim 40 \text{ ms}$ ^[18], 同时考虑保护采样计算时间, 本直流线路后备保护在故障发生后 250 ms 左右即可出口动作。

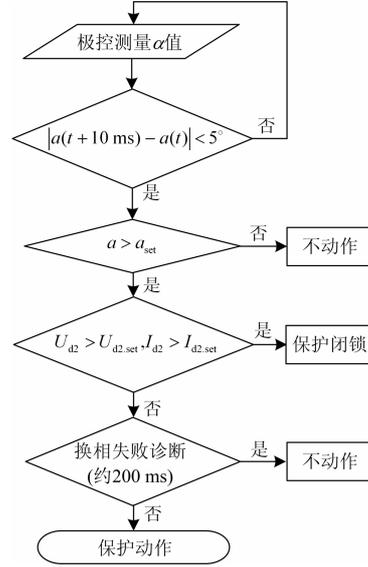


图 4 保护算法流程图

Fig. 4 Flowchart for protection algorithm

另外, 对于交直流混联系统, 当交流系统发生低频振荡或者交流系统含有谐波源时, 直流侧将耦合产生间谐波, 由文献[20]的分析和仿真可知, 100 Hz 左右的低频间谐波含量不足 1% , 远低于保护定值 0.1 p.u. , 保护不会被闭锁。对于交流系统严重的不正常运行状态, 如换流变饱和, 交流侧的三次谐波将在直流侧耦合产生二次谐波, 此时考虑到本保护为后备保护方案, 可通过适当的延时闭锁来规避。

4 系统仿真与验证

将本文所提出的直流线路后备保护方案应用于国际大电网会议(CIGRE)HVDC 标准测试系统, 仿真系统模型如图 1 所示。利用 PSCAD 进行系统仿真, 利用 Matlab 对保护方案进行算法分析。系统参数见文献[18], 结合系统参数和第 3 节保护整定计算方法, 可计算本文提出的保护各定值: $\alpha_{\text{set}} = 48^\circ$, $U_{d2.\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$, $I_{d2.\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$ 。故障发生时刻在 2 s , 持续时间为 0.5 s 。

4.1 区内外故障仿真验证

分别在直流线路区内中点以及整流侧和逆变侧换流母线设置短路故障, 仿真分析整流器触发角 α 、直流侧二次谐波电压 U_{d2} (p.u.) 和直流侧二次谐波电流 I_{d2} (p.u.)。仿真结果如图 5 和表 1 所示。

区内故障时的电气量如图 5(a)所示, 从图中可以看出, 直流线路区内故障瞬间, 换流器触发角迅速增大, 故障后 250 ms , 整流侧触发角增大至 90° 左右; 二次谐波分量在故障瞬间较大, 但此时换流器触发角波动较大, 不满足闭锁条件, 而当触发角稳定时, 二次谐波分量很快衰减为零, 保护无闭锁信

号而可靠动作; 直流线路区外故障时的电气量如图 5(b)所示, 直流线路区内故障后 250 ms, 整流器触发角减少至 5° 左右, 二次谐波分量为 0.3 p.u.左右,

保护被闭锁而不动作。其他类型故障的仿真结果见表 1, 所有结果均为在满足 $|a(t+10\text{ ms}) - a(t)| < 5^\circ$ 时刻的仿真值。

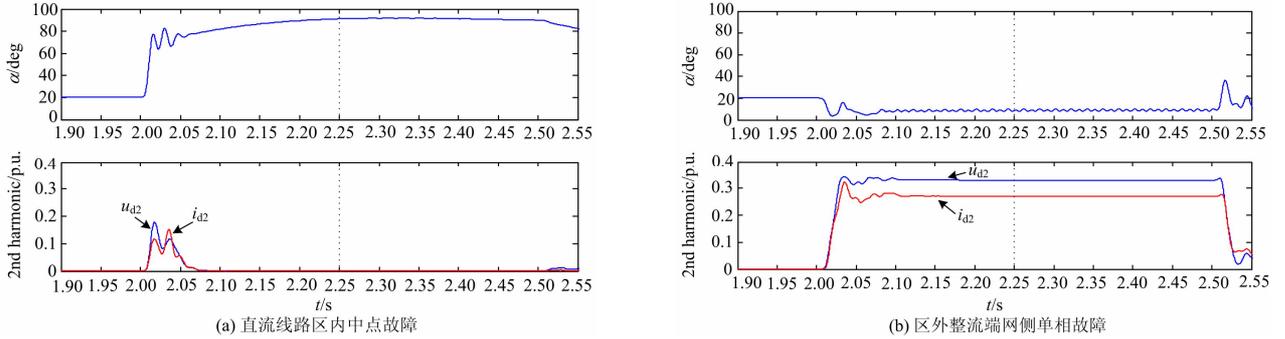


图 5 区内、区外故障时换流器触发角、直流侧二次谐波量仿真结果

Fig. 5 Simulation results for firing angle of converter and second-order harmonic during inner and external faults

表 1 直流线路区外故障仿真结果

Table 1 Simulation results for proposed protection during external faults of DC line

故障类型	α ($\alpha_{\text{set}} = 48^\circ$)	U_{d2} ($U_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	I_{d2} ($I_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	保护动作情况
整流侧两相故障	10.15	0.383	0.314	不动作
整流侧两相接地故障	5.31	0.189	0.155	不动作
整流侧三相故障	5.02	0	0.003	不动作
逆变侧单相接地故障	88.58	0.242	0.198	不动作
逆变侧两相故障	85.86	0.239	0.195	不动作
逆变侧两相接地故障	68.9	0.151	0.125	不动作

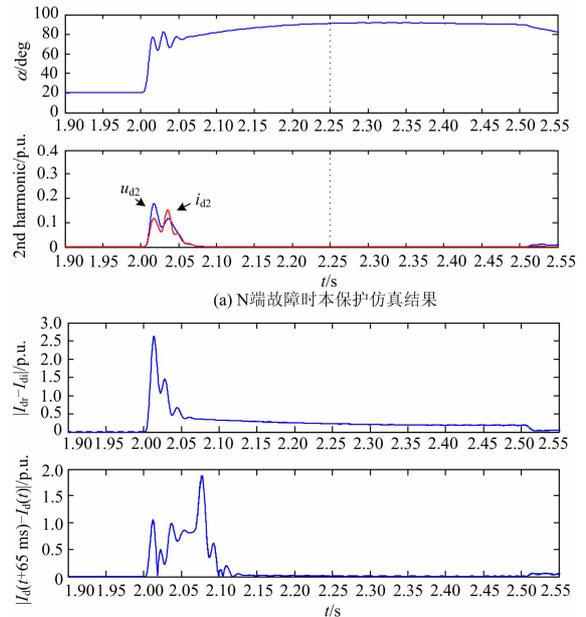
由表 1 可以看出, 在区外不对称故障时, 二次谐波分量均大于闭锁整定值, 保护被闭锁而不动作; 在整流侧三相短路时, 触发角为 5° 左右, 保护也不动作。即本文提出的保护方案能可靠区分直流线路区外故障而不动作。

4.2 区内不同故障点位置保护动作特性仿真验证

为更好地对比分析保护的動作速度, 引入直流线路纵联差动保护的動作判据, 如式(9)所示^[2, 21]。

$$\begin{cases} |I_{\text{dr}} - I_{\text{di}}| > I_{\text{set}} = 0.05 \text{ p.u.} \\ |I_{\text{d}(t+65\text{ ms})} - I_{\text{d}(t)}| > 0.035 \text{ p.u.} \Rightarrow \text{闭锁} 600 \text{ ms} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $|I_{\text{dr}} - I_{\text{di}}|$ 、 $|I_{\text{d}(t+65\text{ ms})} - I_{\text{d}(t)}|$ 分别为整流侧和逆变侧直流电流差、65 ms 内直流电流变化值。分别在直流线路始端、中点以及末端设置金属性短路故障, 仿真分析整流器触发角 α 、直流侧二次谐波电压 U_{d2} (p.u.)、直流侧二次谐波电流 I_{d2} (p.u.); 在相同故障条件下, 分别对直流线路纵联差动保护的整流侧和逆变侧直流电流差 $|I_{\text{dr}} - I_{\text{di}}|$ 、65 ms 内直流电流变化值 $|I_{\text{d}(t+65\text{ ms})} - I_{\text{d}(t)}|$ 进行了仿真, 仿真结果如图 6 和表 2 所示。



(b) N端故障时, 直流线路纵联差动保护仿真结果

注: M端与线路中点故障时, 曲线几乎与此重合不再给出

图 6 本保护与直流线路纵联差动保护仿真结果

Fig. 6 Simulation results for proposed protection and differential protection for DC line

直流线路区内故障时的仿真结果如图 6(a)和表 2 所示, 直流线路始端、中点以及直流线路末端故障 250 ms 后, 换流器触发角在 90° 左右, 二次谐波分量接近于零, 即本保护不论是在线路始端还是线路中点以及末端故障, 在 250 ms 后都能准确区分区内故障而可靠动作; 直流线路纵联差动保护仿真结

果如图 6(b)所示, 不论是直流线路始端、中点还是直流线路末端故障, 都有 $|I_{d(t+65\text{ms})} - I_{d(t)}| > 0.035 \text{ p.u.}$, 直流线路纵联差动保护将闭锁 600 ms 而不动作, 加上躲开外部故障的时间 500 ms, 其动作时间为 1.1 s。据此可知, 本保护动作速度明显优于直流线路纵联差动保护。

表 2 不同故障位置本保护仿真结果

Table 2 Simulation results for proposed protection during different fault location

故障点位置	α ($\alpha_{\text{set}} = 48^\circ$)	U_{d2} ($U_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	I_{d2} ($I_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	保护动作情况
直流线路 M 端	91.64	0.001	0	动作
直流线路中点	91.41	0.001	0	动作
直流线路 N 端	91.06	0.001	0	动作

4.3 保护的抗过渡电阻能力分析

为更好地对比分析保护的抗过渡电阻能力, 引入微分欠压保护的判据, 如式(10)^[2,21]所示。

$$\begin{cases} du_d/dt > \Delta_{1\text{set}} = 0.085 \text{ p.u.} \\ u_d < \Delta_{2\text{set}} = 0.25 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (10)$$

式中, du_d/dt 、 u_d 分别为直流电压变化率和直流电压。分别在直流线路始端、中点以及末端设置经不同过渡电阻接地的短路故障, 仿真分析整流器触发角 α 、直流侧二次谐波电压 U_{d2} (p.u.)和直流侧二次谐波电流 I_{d2} (p.u.); 相同故障条件下, 对微分欠压保护中的直流电压变化率 du/dt 和直流电压 u_d 进行了仿真, 仿真结果如图 7 和表 3 所示。

微分欠压保护仿真结果如图 7 所示, 直流线路中点经 150 Ω 过渡电阻接地时, 即使 $u_d < 0.25 \text{ p.u.}$, 但 $du/dt < 0.085$, 微分欠压保护不动作, 当过渡电阻大于 500 Ω 时, $u_d > 0.25 \text{ p.u.}$, 且 $du/dt < 0.085$, 微分欠压保护可靠不动作。即微分欠压保护对于线路中

点故障抗过渡电阻能力低于 150 Ω ; 对于本文所提出的保护, 仿真结果如表 3 所示, 对于接地电阻为 1 000 Ω 的故障, 保护均能正确动作。据此可知, 本保护抗过渡电阻能力明显优于微分欠压保护。

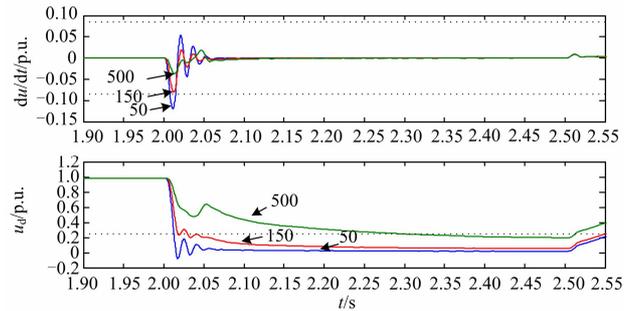


图 7 直流线路中点经不同过渡电阻接地微分欠压保护动作特性仿真结果

Fig. 7 Simulation results for derivative under-voltage protection during different fault resistance

表 3 本文保护直流线路区内不同过渡电阻短路故障仿真结果

Table 3 Simulation results for proposed protection during different fault resistance

故障点位置	过渡电阻/ Ω	α ($\alpha_{\text{set}} = 48^\circ$)	U_{d2} ($U_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	I_{d2} ($I_{d2,\text{set}} = 0.1 \text{ p.u.}$)	保护动作情况
直流线路 M 端	50	86.75	0.000	0.000	动作
	150	84.56	0.000	0.000	动作
	500	75.81	0.001	0.000	动作
	1 000	60.57	0.002	0.002	动作
直流线路中点	50	87.40	0.000	0.000	动作
	150	84.36	0.001	0.000	动作
	500	75.53	0.001	0.000	动作
	1 000	60.13	0.001	0.001	动作
直流线路 N 端	50	86.28	0.001	0.000	动作
	150	84.15	0.001	0.000	动作
	500	75.24	0.001	0.000	动作
	1 000	59.71	0.002	0.002	动作

5 结论

本文在考虑直流控制系统的影响下,利用区内、区外故障时换流器触发角和直流侧二次谐波量构造了一种后备保护方案,并且给出了保护定值计算方法。该保护能正确区分直流线路区内、区外故障,且耐过渡电阻能力强,动作可靠性高。与目前应用的直流线路纵联差动保护相比,该保护不因直流电流波动而被闭锁,动作速度明显优于直流电流差动保护;与微分欠压保护相比,在区外不对称故障时,能结合二次谐波可靠闭锁而不动作,具有较强的抗过渡电阻能力,明显优于微分欠压保护。因此本文提出的保护方案对于实际高压直流输电工程线路后备保护的配置具有重要参考意义。

参考文献

- [1] LONG W, NILSSON S. HVDC transmission: yesterday and today[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 22-31.
- [2] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [3] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网 EMTDC 建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
YU Zhanxun, ZHU Qianru, ZHAO Chengyong, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part one: modeling and simulation of Shandong Grid with DC feed-in system based on EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 58-64.
- [4] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [5] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [6] 李爱民, 蔡泽祥, 任达勇, 等. 高压直流输电控制与保护对线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.
- [7] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.
GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis of performance of HVDC line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.
- [8] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 17-21.
ZHOU Hongyang, YU Jiang, HUANG Jiayin, et al. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.
- [9] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 19-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 19-23.
- [10] 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): 1-7.
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): 1-7.
- [11] 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外故障识别方法[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.
- [12] 吴丽颖, 王增平, 王雪, 等. 高压交直流混合输电直流线路远后备保护研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 1-5.
WU Liying, WANG Zengping, WANG Xue, et al. Study on DC line remote back-up protection in HVAC/DC system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 1-5.

- [13] 傅闯, 饶宏, 黎小林. 交直流混合电网中直流 50 Hz 和 100 Hz 保护研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 57-60.
FU Chuang, RAO Hong, LI Xiaolin. HVDC 50 Hz and 100 Hz protection of AG DC hybrid transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 57-60.
- [14] HU Lihua, MORRISON R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC system operating on an unbalanced supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 973-980.
- [15] 于春光. 计及直流接入的交流系统故障计算方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 1-20.
YU Chunguang. Study on fault analysis method of AC system interconnected with HVDC system[J]. Jinan: Shandong University, 2012: 1-20.
- [16] YU Chunguang, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Fault calculation of AC system interconnected by HVDC system[C] // Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE, Tianjin, China, May 21-24, 2012: 1-6.
- [17] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 44-48.
- [18] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1-25.
- [19] 李思思, 贺兴容, 明志强, 等. 电容换相换流器在预防高压直流换相失败上的特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 88-92.
LI Sisi, HE Xingrong, MING Zhiqiang, et al. Characteristics of capacitor commutated converter in the prevention of HVDC in commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 88-92.
- [20] 余涛, 史军, 任震. 交直流并联输电系统的间谐波研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 118-123.
YU Tao, SHI Jun, REN Zhen. Interharmonic in AC/DC hybrid transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 118-123.
- [21] 李爱民. 高压直流输电线路故障解析与保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 70-80.
LI Aimin. A study on fault analysis and protection of HVDC transmission line[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 70-80.

收稿日期: 2014-03-09; 修回日期: 2014-06-09

作者简介:

刘剑(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: sjtuliujian@gmail.com

范春菊(1967-), 女, 副教授, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中应用的研究及教学工作;

邵能灵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护和电力系统综合自动化研究。