

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181499

基于反行波差值的特高压直流线路纵联保护方案

戴志辉, 张程, 刘宁宁, 王靖宇, 潘星宇

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 纵差保护作为高压直流线路后备保护, 需设置较长延时躲过区外故障时分布电容电流的影响。为提高纵联保护性能, 提出一种基于反行波差值的纵联保护原理。区内故障时, 远离故障侧的反行波与近故障侧的前行波不满足线路的传输函数; 区外故障时, 远离故障侧的反行波与近故障侧的前行波满足线路的传输函数。因此根据传输函数与近故障侧前行波计算远故障侧反行波, 并将计算所得的反行波与实际反行波比较, 识别区内、外故障。在PSCAD/EMTDC中对所提方案进行了验证, 仿真结果表明, 不同故障情况下保护方案均能快速、可靠地识别故障, 并具有良好的耐受高阻能力。

关键词: 特高压直流输电系统; 纵联保护; 反行波; 传输特性; 高阻故障

A pilot protection scheme for UHVDC lines based on backward traveling-wave difference

DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, WANG Jingyu, PAN Xingyu

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As a backup protection for HVDC lines, the current differential protection needs long time delay to avoid the influence of distributed capacitor current under external faults. To improve the performance of pilot protection, a novel protection principle based on backward traveling wave difference is proposed. Under internal faults, the backward traveling wave at the side away from the fault point and the forward traveling wave at the side near the fault point will not satisfy the transmission function of the DC line. In the case of external faults, the backward traveling wave at the side away from the fault point and the forward traveling wave at the side near the fault point satisfy the transmission function of the DC line. Therefore, according to the transmission function and the forward traveling wave at the side near the fault point, the backward traveling wave at the side away from the fault point can be calculated to compare with the actual/sampled backward traveling wave to discriminate internal and external faults. The proposed principle is verified in PSCAD/EMTDC, and simulation results show that, it can identify the fault reliably and rapidly under different fault scenarios, while having better tolerance to high fault resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

Key words: UHVDC; pilot protection; backward traveling wave; transmission characteristics; high-resistance faults

0 引言

特高压直流输电作为现代电网的重要组成部分, 被广泛应用在远距离大容量送电、区域电网互联等领域^[1-2]。特高压直流线路送电距离远、工作条件复杂, 发生故障的几率较大^[3], 因此研究可靠的

线路保护方案对特高压直流系统的稳定运行具有重要意义。现有的直流线路以行波保护作为主保护, 微分欠压保护、电流纵差保护作为后备保护^[4-5]。行波保护和微分欠压保护均以电压变化率作为动作方程, 具有动作速度快的优点, 但抗干扰性差, 耐受高阻故障能力有限^[6]。电流纵差保护作为后备保护, 可有效地识别高阻故障并保护线路的全长, 但考虑到区外故障时分布电容电流的影响, 该保护存在较长延时, 难以保证动作的快速性^[7]。

为提高纵联保护的動作性能, 文献[8]给出一种

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017MS096)

采用分布参数模型补偿分布电容电流的纵联保护方案, 但此方法的补偿效果受线路参数影响较大; 文献[9-10]分别将 S 变换、小波变换与纵联保护原理相结合, 降低了故障位置、故障电阻对判据的影响, 但此类信号处理方法实现复杂、计算量大; 文献[11]提出一种基于行波波形相关系数的纵联保护原理, 可以准确检测出区内高阻故障; 文献[12]利用反行波幅值的积分比来识别区内外故障, 提高了后备保护的動作速度; 文献[3,13]利用特定频率下线路两侧电气量差异构成保护判据, 计算量较小但需准确提取特征频率; 文献[14]计及控制系统作用, 利用两侧受控电流偏差的均值构成判据, 具有较好的動作特性和耐受过渡电阻能力, 但需对部分控制环节进行改进。

本文通过分析区内外故障时两侧初始行波的传输关系, 提出一种耐受高阻故障的快速后备保护原理。该方法利用远离故障侧的实际反行波与计算反行波的差值判别区内、外故障, 原理简单、便于实现, 仿真结果表明该方法对区内 500Ω 高阻故障仍具有良好的動作性能。

1 区内外故障时的初始行波

1.1 行波的传输特性

根据叠加原理, 直流线路发生故障后可只对故障分量进行讨论。故障分量相当于系统电势为零时, 在故障点 f 处叠加一个与该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的附加电源 u 。在此电源的作用下, 分布电容和电感会产生充放电过程, 引起电场能和磁场能的相互转化, 进而产生由故障点 f 向线路两端传播的行波^[15]。

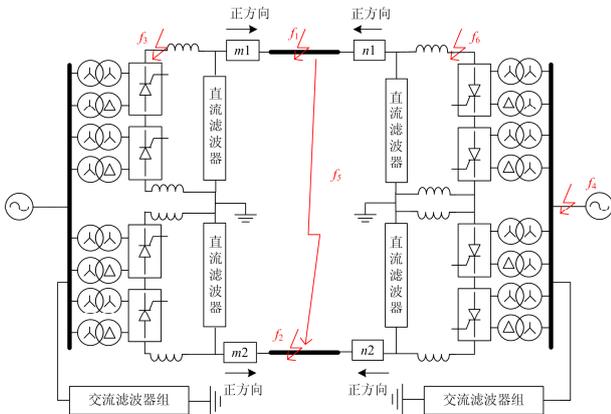


图 1 特高压直流输电系统
Fig. 1 UHVDC transmission system

以图 1 所示的特高压直流输电系统为例, 对区内、外故障时线路两端初始电压行波满足的传输关

系进行分析。其中, 电流、行波的正方向均为母线指向线路; 定义沿正方向运动的行波为前行波, 反之则为反行波。 f_1 为正极线路故障, f_2 为负极线路故障, f_3 为整流站平波电抗器外侧故障, f_4 为逆变侧交流系统故障, f_5 为双极线路故障, f_6 为逆变站平波电抗器外侧故障。

行波在均匀无损线路上传输时始终满足时延关系。以 m 侧电压前行波传输至 n 侧为例, 有

$$u_{nb}(l, t + l/v) = u_{mf}(0, t) \quad (1)$$

式中: l 为直流线路的长度; v 代表行波传输的速度; u_{mf} 代表 m 侧电压前行波; u_{nb} 代表 u_{mf} 传输至 n 侧时保护感受到的反行波。

对于有损线路, 在计及损耗的前提下, 行波仍满足特定的传输关系, 如式(2)所示。

$$U_{nb}(l, s) = U_{mf}(0, s)e^{-\gamma(s)l} \quad (2)$$

式中, $e^{-\gamma(s)l}$ 为计及衰减、时延等特性的传输函数, 表征行波在均匀线路上满足的传输关系。

1.2 区外故障时的初始行波

当特高压直流线路发生逆变侧区外故障 f_6 时, 初始行波传输的示意图如图 2 所示。

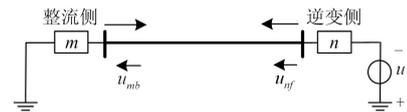


图 2 区外故障 f_6 时的初始行波

Fig. 2 Initial traveling waves under external fault f_6

由图 2 可以看出, 对于区外 f_6 点故障, 近故障点的 n 侧首先感受到前行波 u_{nf} , 经过 $T(T = l/v)$ 时间的传输后, 远离故障点的 m 侧感受到反行波 u_{mb} 。由于区外故障时, 线路上没有出现波阻抗不连续的点, 即线路的均匀性没有遭到破坏, $u_{mb}(t)$ 、 $u_{nf}(t)$ 两者之间满足线路的传输函数, 将其对应的复频域值代入式(2), 可得式(3)。

$$U_{mb}(s) = U_{nf}(s)e^{-\gamma(s)l} \quad (3)$$

当发生整流侧区外故障 f_3 时, 近故障点的 m 侧首先感受到前行波 $u_{mf}(t)$, 远离故障点的 n 侧随后感受到反行波 $u_{nb}(t)$ 。因此, 对于所有的区外故障, 均有近故障侧首先感受到前行波, 经时间 T 后远离故障侧感受到反行波, 二者之间满足式(4)。

$$U_b(s) = U_f(s)e^{-\gamma(s)l} \quad (4)$$

式中, $U_f(s)$ 、 $U_b(s)$ 分别为近故障侧的电压前行波、远离故障侧的电压反行波。

1.3 区内故障时的初始行波

当特高压直流线路发生经过渡电阻 R_f 的区内接地故障 f_1 时, 初始行波传输示意图如图 3 所示。

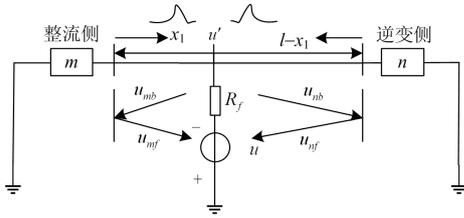
图3 区内故障 f_1 时的初始行波Fig. 3 Initial traveling waves under internal fault f_1

图3中, 经过渡电阻 R_f 接地的线路故障点处初始行波 $U'(s)$ 与故障附加电压 $U(s)$ 的关系满足式(5)^[16]。

$$U'(s) = \frac{Z_C}{Z_C + 2R_f} U(s) \quad (5)$$

式中, Z_C 为线路波阻抗。

由图3可以看出, 线路 m 、 n 两侧分别先感受到初始电压反行波 u_{mb} 、 u_{nb} , 随后两侧的反行波各自在线路边界处发生反射, 得到本侧的前行波。此时近故障侧电压前行波 $U_f(s)$ 和远故障点侧电压反行波 $U_b(s)$ 的表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} U_f(s) = N_f U'(s) e^{-\gamma(s)x_1} = N_f \frac{Z_C}{Z_C + 2R_f} U(s) e^{-\gamma(s)x_1} \\ U_b(s) = U'(s) e^{-\gamma(s)(l-x_1)} = \frac{Z_C}{Z_C + 2R_f} U(s) e^{-\gamma(s)(l-x_1)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_1 为故障点与近故障侧的距离; N_f 为行波反射系数。

区内故障时, $U_f(s)$ 、 $U_b(s)$ 满足式(7)所示关系。

$$U_b(s) = \frac{U_f(s)}{N_f} e^{-\gamma(s)(l-2x_1)} \quad (7)$$

区内故障时, 线路上故障点的存在使波阻抗不再连续, 整段线路的均匀性遭到破坏。由式(7)可见, 此时近故障侧前行波与远离故障侧反行波之间所满足的关系与故障位置和反射系数有关, 与式(4)相比, 不再满足简单的线路传输函数关系。因此, 考虑综合近故障侧前行波和远离故障侧反行波的信息构造保护判据。

根据上述分析, 区外故障时 $U_b(s) - U_f(s)e^{-\gamma(s)l}$ 的值为0, 考虑到计算误差, 应为接近于0的较小值; 而区内故障时, $U_b(s) - U_f(s)e^{-\gamma(s)l}$ 的值较大。根据式(5)~式(7)分析可知, 过渡电阻只对故障点处和线路两侧初始行波的幅值产生影响, 而不会改变线路两侧行波之间的传输关系, 因此构造的保护判据适用于高阻接地故障。对于长距离的分布参数线

路, $\gamma(s)$ 为复数。为得到 $U_b(s) - U_f(s)e^{-\gamma(s)l}$ 的时域形式, 应综合 $e^{-\gamma(s)l}$ 的性质对其进行近似, 进而求得拉氏反变换。

2 线路的传输函数

受频变参数的影响, 故障行波会发生畸变和衰减; 同时受分布参数的影响, 故障行波的传输还具有时延特性。因此传播函数 $e^{-\gamma(s)l}$ 应同时包含畸变、衰减和时延这三方面信息。根据文献[17]的分析, $e^{-\gamma(s)l}$ 可近似写成式(8)的形式。

$$e^{-\gamma(s)l} \approx G(s)e^{-sl/v} \quad (8)$$

式中: $G(s)$ 用来描述行波在传播过程中发生的畸变和衰减; $e^{-sl/v}$ 则用来描述行波在分布参数线路上传播的延时特性; v 为行波在模域中的波速。

图4给出了特高压直流线路上某点发生接地故障后不同传输距离处的故障电压。由图4可见, 受长距离线路的分布参数特性影响, 故障的初始阶跃波在传输一定的距离后会发生畸变和衰减。由控制原理可知, 阶跃信号经过一阶系统后的时域响应与畸变行波具有相似波形^[17]。因此 $G(s)$ 可取为 $(as+b)^{-1}$ 的形式, 定义 a 为故障行波在模域的畸变系数; b 为故障行波在模域内的衰减比例系数。

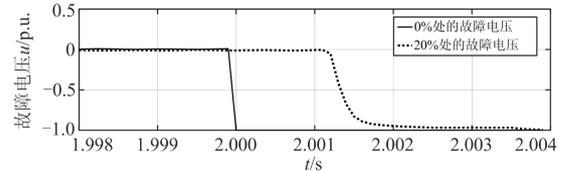


图4 初始阶跃波与畸变行波

Fig. 4 Initial step wave and distorted traveling wave

当直流线路发生区外故障时, 由式(4)、式(8)可得

$$U_b(s) \approx U_f(s) \frac{1}{as+b} e^{-sl/v} \quad (9)$$

对于形如 $A(s) = B(s)e^{-sl/v}$ 的表达式, 其拉氏反变换为 $a(t) = b(t-l/v)$, 故式(9)的拉氏反变换为

$$u_b(t) \approx u_f\left(t - \frac{l}{v}\right) * \frac{1}{a} e^{-\frac{b}{a}\left(t - \frac{l}{v}\right)} \quad (10)$$

式中: $u_b(t)$ 为远离故障侧的实际反行波; “*” 代表卷积运算。为描述方便, 将式(10)的右边记为

$$u'_b(t) = u_f\left(t - \frac{l}{v}\right) * \frac{1}{a} e^{-\frac{b}{a}\left(t - \frac{l}{v}\right)} \quad (11)$$

式中, $u'_b(t)$ 为由近故障侧前行波计算而得的远离故障侧反行波。 $U_b(s) - U_f(s)e^{-\gamma(s)l}$ 转化到时域中即可写为 $u_b(t) - u'_b(t)$ 的形式。在区外故障时, 由于近故

障侧前行波和远离故障侧反行波之间满足线路的传输函数,因此 $u_b(t) - u'_b(t)$ 的值较小;而区内故障时,式(9)的传输关系被破坏,此时 $u_b(t) - u'_b(t)$ 的值较大。因此,本文利用 $u_b(t) - u'_b(t)$ 的幅值信息来识别区内、外故障,提出基于实际反行波与计算反行波差值的纵联保护方案。

3 基于反行波差值的纵联保护方案

3.1 故障启动判据

区内或区外故障时,近故障侧首先检测到电压跌落,远故障侧随后检测到电压跌落,通过检测电压跌落的时间即可判断线路两侧距离故障点的远近。进一步利用远离故障侧电压突变量的幅值 $|\Delta u_i|$ 构造保护启动判据如式(12)所示。

$$|\Delta u_i| > k \quad (12)$$

式中: i 可取 m 或 n ,即线路两侧均计算式(12); k 为故障启动整定值,取 $k=0.1U_N$, U_N 为直流线路的额定运行电压。

除线路中点外的其他点发生故障时,线路两侧分别检测到 $|\Delta u_m| > k$ 、 $|\Delta u_n| > k$ 的时间不同,近故障点侧首先满足式(12),远离故障点侧后满足式(12)。记录远离故障点侧连续5个采样点均满足式(12)的时刻,此时启动元件动作并识别出远故障点侧,后续利用远故障点侧反行波的计算值和测量值进行故障识别。线路中点故障时,线路两侧与故障点的距离相同,检测到电压突变量 $|\Delta u_m| > k$ 、 $|\Delta u_n| > k$ 的时间也几乎相同,此时线路任一侧电压满足式(12)时保护启动,并将任一侧定义为近故障点侧,另一侧为远离故障点侧。本文关于中点故障的仿真分析中均定义 m 侧为远离故障点侧, n 侧为近故障点侧。

3.2 区内外故障识别判据

特高压直流输电系统两极运行时正负两极之间存在电磁耦合,一极发生故障时,另一极也会产生暂态电压和电流行波。因此对故障行波进行相模变换,得到线模分量和地模分量。由于地模分量在长距离线路上的衰减和色散较为严重^[18],而线模分量在传播过程中可以看作直角波且在不同位置形状近似相同,故选择线模分量对前、反行波进行计算^[11]。线模实际前行波、反行波的计算公式如式(13)所示。

$$\begin{aligned} u_{f1}(t) &= \frac{1}{2}(\Delta u_1(t) + Z_{c1}\Delta i_1(t)) \\ u_{b1}(t) &= \frac{1}{2}(\Delta u_1(t) - Z_{c1}\Delta i_1(t)) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $u_{f1}(t)$ 和 $u_{b1}(t)$ 分别为电压线模前、反行波;

$\Delta u_1(t)$ 、 $\Delta i_1(t)$ 为故障电压、电流的线模分量; Z_{c1} 为线路线模波阻抗。

由3.1节分析可知,在直流线路区内、外故障时,远离故障侧实际反行波 $u_b(t)$ 与由近故障侧前行波计算而得反行波 $u'_b(t)$ 的差值相差较大。综合线模分量的特点和区内外故障特性,可基于远离故障侧实际线模反行波与计算线模反行波差值的有效值构造区内故障识别判据,如式(14)所示。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_{b1}(k) - u'_{b1}(k))^2} > \Delta u_{b1set} \quad (14)$$

式中: $k=1,2,3,\dots,N$,表示检测到故障后的各个采样点; N 为启动判据成立后2ms时间窗的采样点个数; u_{b1} 为远离故障侧实际线模反行波; u'_{b1} 为根据近故障侧前行波得到的远离故障侧计算线模反行波; Δu_{b1set} 为故障识别判据的整定值。

3.3 故障识别整定值确定方法

故障识别判据的整定值可按式(15)计算。

$$\Delta u_{b1set} = K_{rel} \Delta u_{b1} \quad (15)$$

式中: Δu_{b1} 为发生直流线路区外最严重故障时,远离故障侧实际线模反行波与计算反行波差值的有效值; K_{rel} 为可靠系数,本文取1.2。

对于 Δu_{b1} ,作如下考虑。特高压直流输电工程中线路末端往往装有平波电抗器^[19],而末端平波电抗器外侧故障是最严重的区外故障^[20]。因此应按照平波电抗器外侧故障的情况对整定值进行整定,计算检测到故障后2ms内的整流侧实际反行波与计算反行波差值的有效值,如式(16)所示。

$$\Delta u_{b1} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_{kb1}(k) - u'_{kb1}(k))^2} \quad (16)$$

式中, u_{kb1} 、 u'_{kb1} 分别为末端平波电抗器外侧故障时整流侧的实际、计算线模反行波。 u'_{kb1} 的计算方法在式(11)中已给出,其中 a 、 b 的取值方式如下:线路参数依频变化对线模参数的影响较小,即随着频率的变化,线模分量的波速变化较小,色散带来的波形畸变不大^[18],取畸变系数 $a=1$ 。电压行波沿均匀有损线传输时的衰减主要由电场能量的损耗引起^[21],其衰减比例系数 b 按式(17)计算。

$$b = g/c \quad (17)$$

式中, g 、 c 分别为分布参数线路的单位长度电导和电容。

3.4 故障选极判据

由于3.1节识别原理中采用的是线模分量而非极量,因此区内正极、负极、双极故障中任意一种

故障发生时, 均满足式(14), 故保护方案应配置故障选极判据。多数情况下, 特高压直流输电系统采用对称运行方式, 此时利用两极整流侧电压突变量的幅值关系 $|\Delta u_{R1}| > |\Delta u_{R2}|$ 或 $|\Delta u_{R1}| < |\Delta u_{R2}|$ 即可判断是正极或负极故障。

实际工程中可能会采用不对称方式运行, 因此应考虑一定的裕度。定义 K_{R1} 、 K_{R2} 分别为正极和负极电压突变量的积分值, 如式(18)和式(19)所示。

$$K_{R1} = \int_t^{t+T} |\Delta u_{R1}| dt \quad (18)$$

$$K_{R2} = \int_t^{t+T} |\Delta u_{R2}| dt \quad (19)$$

式中: t 为保护启动的时间; T 为数据窗长, 取为 2 ms; Δu_{R1} 和 Δu_{R2} 分别为整流侧正极电压变化量和负极电压变化量。对式(18)和式(19)进行离散化, 分别得式(20)和式(21)。

$$K_{R1} = \sum_{k=1}^N |\Delta u_{R1}| T_s \quad (20)$$

$$K_{R2} = \sum_{k=1}^N |\Delta u_{R2}| T_s \quad (21)$$

式中, T_s 为采样周期。故障选极判据如式(22)。

$$\begin{cases} \frac{K_{R1}}{K_{R2}} > 1.2 & \text{正极故障} \\ 0.8 < \frac{K_{R1}}{K_{R2}} < 1.2 & \text{双极故障} \\ \frac{K_{R1}}{K_{R2}} < 0.8 & \text{负极故障} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中关于整定值 0.8、1.2 的取值可根据可靠性要求进行适当调整。

3.5 保护流程

根据上述的区内外故障识别判据和故障选极判据, 提出如图 5 所示的保护方案。以电压变化量作为启动判据, 以实际反行波与计算反行波差值的有效值作为故障识别判据, 以电压突变量积分的比值作为选极判据。当识别为区内故障并进行选极后, 对应极的保护动作。

4 仿真验证

4.1 仿真模型与参数

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的直流输电系统仿真模型, 额定输送功率 6 400 MW, 额定电压和电流分别为 ± 800 kV 和 4 kA。其中, 直流线路采用相域频率相关模型, 线路长度为 1 891 km, 代表档距 500 m, 弧垂 26 m, 杆塔参数如图 6 所示。

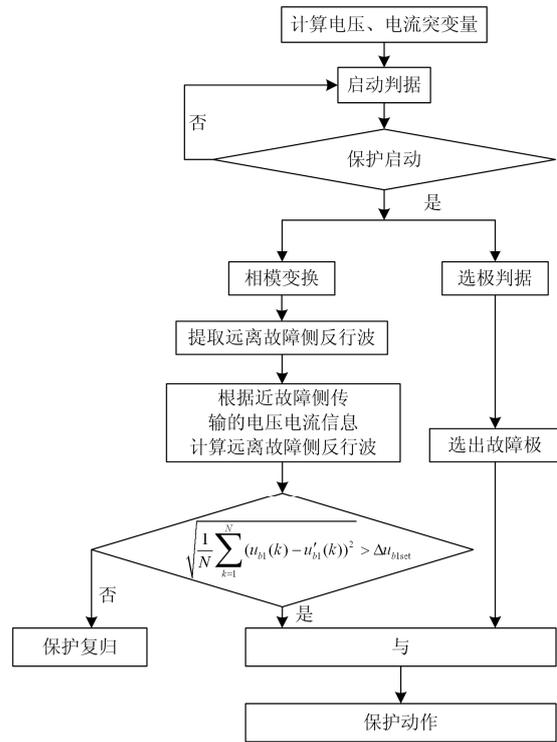


图 5 基于反行波差值的纵联保护方案流程

Fig. 5 Flow chart of a pilot protection scheme based on backward traveling wave difference value

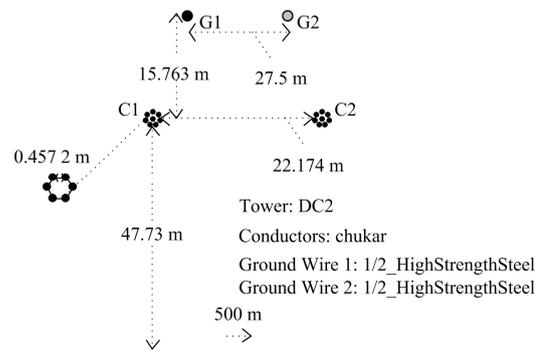


图 6 特高压直流线路结构

Fig. 6 UHVDC transmission line configuration

考虑到目前实际运行的直流控保系统的采样率为 10 kHz^[12], 因此保护的采样频率为 10 kHz, $N=20$ 。线模波阻抗为 217 Ω , 线模波速为 2.946×10^8 m/s。由仿真得 $g = 10^{-11}$ S/m, $c = 1.191 \times 10^{-11}$ F/m, 故障点 f_1 — f_6 如图 1 所示。

4.2 典型故障分析

本部分对所提保护方案进行验证并与传统电流纵差保护进行对比。为避免区外交流系统故障时电容充放电电流引起的保护误动, 传统纵差保护采用了延时闭锁逻辑: 将线路整流侧或逆变侧直流电流采样值与 65 ms 前的采样值相减, 若差值大于

0.2 p.u., 则将该保护闭锁 600 ms。线路发生故障后, 直流线路两侧的电 流发生突变, 该闭锁逻辑启动。闭锁结束后, 判断两侧电流的差值是否满足式(23)。

$$|i_m - i_n| > i_{set} \quad (23)$$

式中: i_m 、 i_n 分别为线路整流侧、逆变侧直流电流, $|i_m - i_n|$ 为保护差流; i_{set} 为保护定值, 取为 0.05 p.u.。如保护差流满足式(23)并持续 500 ms, 则纵差保护动作。可见, 延时闭锁逻辑将纵差保护闭锁 600 ms, 加之纵差保护自身的 500 ms 出口延时, 因此保护动作时间约为 1.1 s^[22]。

4.2.1 区内故障

当末端平波电抗器外侧故障时, $\Delta u_{b1} = 0.096 9$, $\Delta u_{b1set} = 0.116 28$ 。

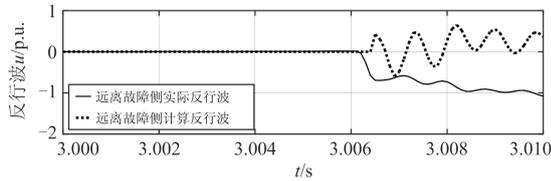


图 7 区内线路末端故障时整流侧实际反行波与计算反行波
Fig. 7 Rectifier-side actual and calculated backward traveling waves under internal fault at the line end

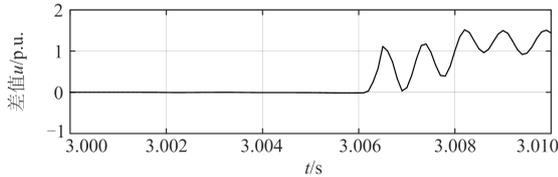


图 8 区内线路末端故障时整流侧实际反行波与计算反行波差值

Fig. 8 Difference between rectifier-side actual and calculated backward traveling waves-under-internal fault at line end

在正极线路末端设置金属性故障 f_1 , 故障时刻为 3 s。远离故障点的整流侧反行波和由逆变侧前行波计算的整流侧反行波及差值如图 7 和图 8 所示。启动元件于 3.006 4 s 检测到故障发生, 其后 2 ms 内整流侧实际反行波与计算反行波差值的有效值为 0.896 3, 大于 0.116 28, 判为区内故障。根据式(20)和式(21)计算线路正、负极电压突变量的积分值之比 $K_{R1}/K_{R2} = 2.358 7$ 。根据故障选极判据, 正极发生故障。综合故障识别判据, 保护应立刻动作。本文方法能够有效地区分线路末端故障和区外故障, 具有良好的选择性。

图 9 为发生故障 f_1 时的差动电流。在故障发生时刻 3 s 时, 差流接近 2.5 p.u., 高于定值, 但由于此时整流侧电流与 65 ms 前的电流差值大于 0.2 p.u., 因此将该保护闭锁 600 ms。闭锁结束后,

保护的差流可达到 0.55 p.u., 高于定值 0.05 p.u., 且可持续 500 ms, 因此常规纵差保护在故障发生后 1.1 s 动作。

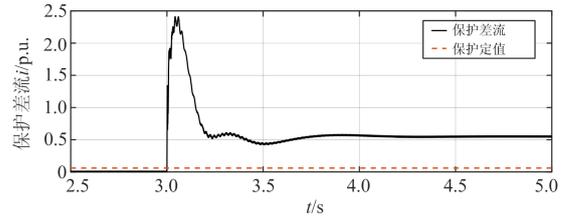


图 9 区内线路末端故障时的差动电流

Fig. 9 Differential current under internal fault at the line end

在负极线路中点处设置过渡电阻为 100 Ω 的单极接地故障 f_2 , 故障时刻为 3 s。整流侧实际反行波和由逆变侧前行波计算的整流侧反行波及差值如图 10 和图 11 所示。启动元件于 3.003 3 s 检测到故障发生, 其后 2 ms 内整流侧实际反行波与计算反行波差值的有效值为 0.418 4, 大于 0.116 28, 判为区内故障。根据式(20)和式(21)计算线路正、负极电压突变量的积分值之比 $K_{R1}/K_{R2} = 0.230 7$, 根据故障选极判据, 负极发生故障。综合故障识别判据, 保护应立刻动作。

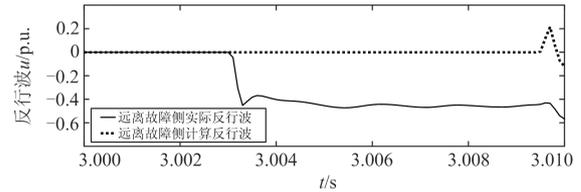


图 10 区内线路中点处故障时整流侧实际反行波与计算反行波

Fig. 10 Rectifier-side actual and calculated backward traveling waves under internal fault at the middle of the line

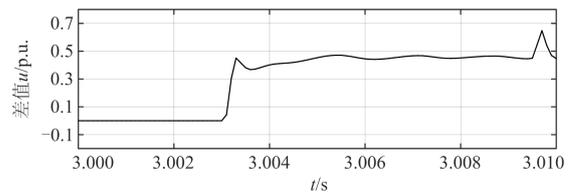


图 11 区内线路中点处故障时整流侧实际反行波与计算反行波差值

Fig. 11 Difference between rectifier-side actual and calculated backward traveling waves-under-internal fault at the middle of the line

图 12 为发生故障 f_2 时的差动电流。在故障发生时刻 3 s 时, 差流接近 1.6 p.u., 高于定值, 但由于此时整流侧电流与 65 ms 前的电流差值大于 0.2 p.u., 因此将该保护闭锁 600 ms。闭锁结束后, 保护差流可达到 0.56 p.u., 高于定值 0.05 p.u., 且可

维持 500 ms, 因此常规纵差保护在故障发生后 1.1 s 动作。

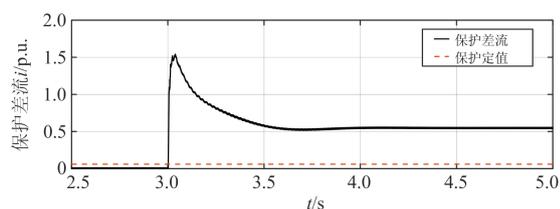


图 12 区内线路中点处故障时的保护差流

Fig. 12 Differential current under internal fault at the middle of the line

4.2.2 区外故障

在整流站平波电抗器外侧设置过渡电阻为 $1\ \Omega$ 的接地故障 f_3 。逆变侧提取到的反行波和由整流侧前行波计算得到的逆变侧反行波及差值如图 13 和图 14 所示。启动元件于 3.006 8 s 检测到故障发生, 其后 2 ms 内逆变侧实际反行波与计算反行波差值的有效值为 0.091 9, 小于 0.116 28, 判断为区外故障。此时无论选极判据的结果如何, 保护均不动作。

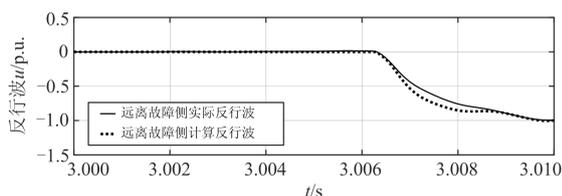


图 13 区外整流站平波电抗器外侧故障时逆变侧实际反行波与计算反行波

Fig. 13 Inverter-side actual and calculated backward traveling waves under external fault on the valve side of smoothing reactor in rectifier station

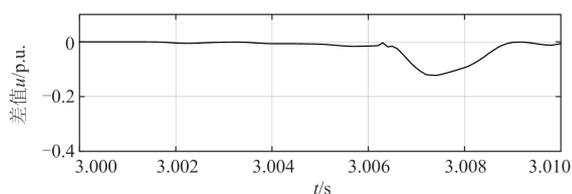


图 14 区外整流站平波电抗器外侧故障时逆变侧实际反行波与计算反行波差值

Fig. 14 Difference value between inverter-side actual and calculated backward traveling waves under external fault on the valve side of smoothing reactor in rectifier station

图 15 为发生故障 f_3 时的差动电流。在故障发生时刻, 差流接近 0.72 p.u., 已高于定值, 但由于此时整流侧电流与 65 ms 前的电流差值大于 0.2 p.u., 因此将纵联保护闭锁 600 ms。闭锁结束后,

保护差流峰值虽可达到 0.34 p.u., 但幅值一直在波动, 不满足在 500 ms 内始终大于保护定值的要求, 因此纵差保护不动作, 此时需延时 1.1 s 才能判断出区外故障。

在逆变侧交流系统 A 相发生经 $10\ \Omega$ 过渡电阻的接地故障 f_4 , 故障时刻为 3 s。整流侧提取到的反行波和由逆变侧前行波计算得到的整流侧反行波分别如图 16 和图 17 所示。启动元件于 3.007 3 s 检测到该故障, 其后 2 ms 内整流侧实际反行波与计算反行波差值的有效值为 0.035 3, 小于 0.116 28, 判为区外故障。此时无论选极判据的结果如何, 保护均不动作。

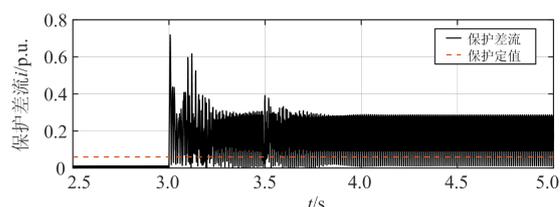


图 15 区外整流站平波电抗器外侧故障时的保护差流

Fig. 15 Differential current under external fault on the valve side of smoothing reactor in rectifier station

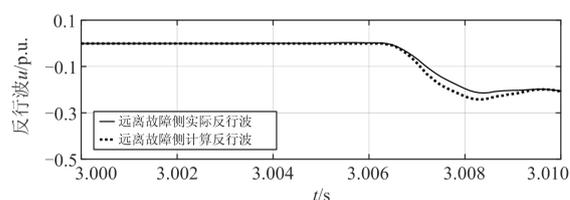


图 16 区外逆变侧 A 相接地故障时整流侧实际反行波与计算反行波

Fig. 16 Rectifier-side actual and calculated backward traveling waves under phase A grounded fault at inverter side

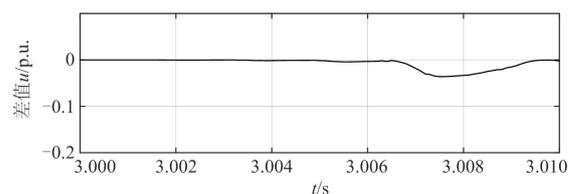


图 17 区外逆变侧 A 相接地故障时整流侧实际反行波与计算反行波差值

Fig. 17 Difference between rectifier-side actual and calculated backward traveling waves under phase A grounded fault at inverter side

图 18 为发生故障 f_4 时的差动电流。故障发生在 3 s 时刻, 差流接近 0.52 p.u., 已高于定值, 但由于此时整流侧电流与 65 ms 前的电流差值大于

0.2 p.u., 因此将该保护闭锁 600 ms。闭锁结束后, 差流的幅值一直在波动, 不满足在 500 ms 内始终大于定值的要求, 故纵差保护不动作, 此时需延时 1.1 s 才能判断出区外故障。

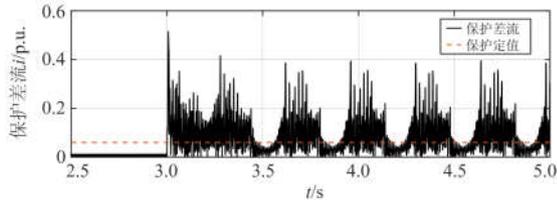


图 18 区外逆变侧 A 相接地故障时的保护差流

Fig. 18 Differential current under phase A grounded fault at inverter side

4.2.3 不同位置的仿真结果

表1和表2分别给出了区内外不同位置、不同故障电阻故障时所提保护方案的动作情况。由表1可见, 所提方案可在全线经500 Ω过渡电阻的接地故障下动作, 具有耐高阻故障的能力; 当发生表2所示的区外故障时, 保护可靠不动作。

除了耐受高阻故障能力, 本方法的快速性也高于传统纵联保护。本保护的启动时间主要由启动时

表 1 区内故障的判据动作情况一览

Table 1 List of criteria actions to internal faults

故障位置	相对首端距离/%	过渡电阻/Ω	故障启动时间/s	反行波差值的有效值	K_{R1}/K_{R2}	判断结果	
正极	f_1	5	3.006 4	0.830 9	1.727 5	正极区内故障	
		0.5	100	3.006 5	0.540 3	1.862 5	正极区内故障
		500	3.006 7	0.217 3	1.526 4	正极区内故障	
		5	3.006 4	0.835 7	2.350 1	正极区内故障	
		99.5	100	3.006 5	0.514 1	2.230 2	正极区内故障
负极	f_2	500	3.006 7	0.206 2	1.849 1	正极区内故障	
		5	3.005 2	0.647 5	0.269 5	负极区内故障	
		20	100	3.005 2	0.414 4	0.351 7	负极区内故障
		500	3.006 2	0.194 9	0.618 8	负极区内故障	
		5	3.005 2	0.621 1	0.313 3	负极区内故障	
双极	f_3	80	100	3.005 2	0.397 0	0.305 2	负极区内故障
		500	3.005 5	0.184 8	0.359 1	负极区内故障	
		5	3.004 5	1.718 8	0.999 6	双极区内故障	
		30	100	3.004 5	1.246 5	0.998 8	双极区内故障
		500	3.004 6	0.587 5	0.988 4	双极区内故障	
f_4	50	5	3.003 2	1.728 9	1.000 8	双极区内故障	
		100	3.003 3	1.277 9	1.000 1	双极区内故障	
		500	3.003 3	0.592 0	1.000 7	双极区内故障	

表 2 区外故障的判据动作情况一览

Table 2 List of criteria actions to external faults

故障位置	过渡电阻/Ω	故障启动时间/s	实际与计算反行波的差值有效值	K_{R1}/K_{R2}	判断结果
区外	1	3.006 8	0.091 9	0.545 8	区外
	f_3	20	3.006 8	0.049 2	1.578 5
区外	1	3.006 9	0.056 2	1.001 3	区外
	f_4	20	3.007 3	0.023 8	1.004 7

间、算法时间和通信时间构成。对于启动时间和算法时间, 启动时间约为 6 ms, 区内外故障识别与故障选极的数据窗均为 2 ms, 且运算量较小; 对于通信时间, 目前通道的延时通常在 20 ms 以下^[12], 因此本文所提方案的动作时间在 30 ms 内。即使考虑 UHVDC 系统传输两端信息的通信延时为 65 ms^[23], 所提方案与传统的直流线路纵联保护 1.1 s 的动作时间相比, 也有优势。

5 结论

结合线模分量的特点对线路两侧的初始行波传输关系进行分析, 提出了基于远离故障侧实际反行波与计算反行波差值纵联保护方法。区内故障时, 远离故障侧实际反行波与计算反行波的差值较大; 而区外故障时, 远离故障侧实际反行波与计算反行波的差值较小。该方法原理简单、便于实现, 可有效区分区内、外故障。

所提方法的动作时间在 30 ms 内, 具备故障选极能力; 此外, 该方法具有一定的耐受过渡电阻能力, 在末端高阻故障时也能正确动作, 可作为特高压直流线路的快速后备保护。

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.
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.

[2] 李振兴, 谭洪, 叶诗韵, 等. 应用 ΔI 极性与信号处理的 UHVDC 输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 68-75.
LI Zhenxing, TAN Hong, YE Shiyun, et al. A new scheme for UHVDC transmission line protection using ΔI polarity and signal processing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 68-75.

- [3] 魏德华, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 75-82.
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.
- [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] 张艳霞, 李多多, 张帅, 等. 基于广义 S 变换的高压直流输电线路边界保护[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3197-3206.
ZHANG Yanxia, LI Duoduo, ZHANG Shuai, et al. Boundary Protection of HVDC Transmission Lines Based on Generalized S-transform. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3197-3206.
- [6] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LE Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [7] ZOU G, HUANG Q, SONG S. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [8] 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(17): 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(17): 45-49.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 孔飞, 张保会, 王艳婷. 基于行波波相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 108-114.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of travelling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.
- [12] 李小鹏, 汤涌, 滕予非, 等. 基于反行波幅值比较的高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3095-3101.
LI Xiaopeng, TANG Yong, TENG Yufei, et al. A pilot protection method based on amplitude comparison of backward traveling wave for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3095-3101.
- [13] 刘剑, 邵能灵, 范春菊. 基于电流波形匹配的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1736-1743.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission line based on current waveform matchings[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1736-1743.
- [14] 刘琪, 宋国兵. 基于电流偏差均值控制特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2159-2167.
LIU Qi, SONG Guobing. A novel pilot protection for HVDC transmission lines using mean current error control characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2159-2167.
- [15] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [16] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [17] 徐敏, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 考虑频变参数和直流控制的直流输电系统线路故障解析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.

- 2015, 39(11): 37-44.
- XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency dependent parameters and HVDC control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 37-44.
- [18] 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.
- [19] LUO S, DONG X, SHI S, et al. A non-unit protection principle based on travelling wave for HVDC transmission lines[C] // Power Engineering Conference, September 1-4, 2015, Stoke on Trent, UK: 1-6.
- [20] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19.
- WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.
- [21] 张力. 基于行波分析的 HVDC 输电线路保护的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- ZHANG Li. Study on HVDC transmission line protection based on the analysis of traveling wave[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [22] 李晓华, 戴扬宇, 丁晓兵, 等. 高压直流纵差保护动作特性分析及改进[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 283-289.
- LI Xiaohua, DAI Yangyu, DING Xiaobing, et al. A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 283-289.
- [23] 戴志辉, 严思齐, 张程, 等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 31-38.
- DAI Zhihui, YAN Siqi, ZHANG Cheng, et al. A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 31-38.

收稿日期: 2018-12-02; 修回日期: 2019-02-07

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源电力系统; E-mail: zhdai@ncepu.edu.cn

张程(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 周金梅)