

行波差动保护不平衡差流分析及实用方案

张武军, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 行波差动保护从原理上消除电容电流的影响, 在超(特)高压远距离输电线路保护中具有突出的优势。然而行波差动保护在应用时, 即使线路内部无故障也会产生一定的不平衡差流。从理论上分析了不平衡差流的 4 方面来源及其影响因素, 即线路电阻模型误差、插值截断误差、两侧数据同步定时误差及空模分量与地模分量波速不一致等因素, 提出了一种行波差动保护的实用方案, 并对滤波技术及采样率进行分析。仿真验证表明, 该方案灵敏度高, 动作速度快, 选相跳闸能力强, 具有良好的应用前景。

关键词: 行波差动保护; 模型误差; 插值截断误差; 同步误差; 不平衡差流

中图分类号: TM 773

0 引言

超(特)高压输电线路保护中, 电流差动保护由于原理简单、动作速度快且具有天然的选相能力而受到普遍关注^[1-3]。近年来, 光纤通信造价大幅下降, 进一步促进了分相电流差动保护的推广和应用, 使其成为超(特)高压输电线路的主保护。然而, 电流差动保护用于架空长线或电缆线路时, 分布电容电流的存在使两端的测量电流不再满足基尔霍夫电流定律, 影响了差动保护的灵敏度和可靠性^[4-6]。行波差动保护能够从理论上消除电容电流的影响, 是减小不平衡差流、提高保护灵敏度的有效途径。

由电磁场理论可知, 电能以波的形式传播, 线路正常运行或故障时, 存在着运动的电压和电流行波。行波保护基于线路故障时由故障点向两侧传播的行波特征来检测故障^[7-13], 包括行波方向保护、行波距离保护和行波差动保护。行波方向保护和行波距离保护需滤除故障前的负荷分量, 并且需要利用故障行波的初始极性 or 反射波到达时间等暂态量特征来识别故障, 对保护装置采样率要求高, 易受母线结构影响^[7-9]。1977 年, 日本学者 Takagi 等基于无损输电线路模型提出行波差动保护原理, 之后东京电力公司研制出第 1 套行波差动保护装置并投运, 它基于线路两侧方向性行波的差值来判断故障^[9-13], 对任何时间段和频率段的故障行波信息, 均能有效识别故障。因此, 行波差动保护在实现时, 可采取适当的滤波措施只选取某个频率(或频率段)的故障信息来判别, 以获取更好的装置综合指标。

行波差动保护用于输电线路, 即使线路无故障也会产生一定的不平衡差流。本文分析了行波不平衡差流的 4 方面来源及各自的影响因素, 并提出一种行波差动保护的实用方案, 能在现有光纤通道基础上实现, 具有良好的工程应用前景。

1 行波差动保护原理

设单相无损线路 MN 长度为 l , 单位长度电感为 L , 电容为 C , u_M 和 u_N 为线路两侧电压, i_M 和 i_N 为两侧电流。由分布参数线路的 D'Alembert 波动方程可知, 线路两端电流均由 2 个波速相同、传输方向相反的行波组成^[12]。设保护装于 M 侧, 定义行波正方向为 M 指向 N, 则线路两端的(2 倍)电流行波为:

$$\begin{cases} i_M^+(t) = i_M(t) + \frac{u_M(t)}{Z_C} \\ i_M^-(t) = -i_M(t) + \frac{u_M(t)}{Z_C} \\ i_N^+(t) = -i_N(t) + \frac{u_N(t)}{Z_C} \\ i_N^-(t) = i_N(t) + \frac{u_N(t)}{Z_C} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z_C = \sqrt{L/C}$ 为线路波阻抗; i_M^+ , i_M^- , i_N^+ , i_N^- 分别表示线路两侧的电流正行波和反行波, 行波在线路上的传播速度为 $v = 1/\sqrt{LC}$ 。

令正向行波差流和反向行波差流分别为:

$$i_{op}^+(t) = |i_M^+(t - \tau) - i_N^+(t)| \quad (2)$$

$$i_{op}^-(t) = |i_M^-(t) - i_N^-(t - \tau)| \quad (3)$$

式中: $\tau = l/v$ 为线路上的行波传输时间。

可见, 线路内部无故障时, $i_{op}^+(t) = i_{op}^-(t) = 0$ 。

区内故障时,故障节点的增加破坏了波的传播方程,式(2)、式(3)定义的行波差流值不再为0,分别为 $|i_F(t-\tau_{NF})|$ 和 $|i_F(t-\tau_{MF})|$,均为故障点电流的函数^[9]。因此,采用正、反向行波差流均可构成行波差动保护。本文以反向行波差动为例讨论,由下文分析可知其具有更快的动作速度。

输电线路三相相互耦合,可采用Clarke变换^[9]分解为0,1,2分量,解耦得各相差流 $i_{op,\kappa}(\kappa=a,b,c)$ 。行波差动保护的分相动作判据为:

$$i_{op,\kappa}(t) > I_{dz}$$

(4)

式中: I_{dz} 为动作电流值,按躲过非区内故障工况下的最大不平衡差流值整定。

2 行波不平衡差流分析

2.1 线路模型误差

行波差动保护原理基于无损线路,而实际输电线路含有电阻,因此模型误差引起不平衡差流,称为 I_{unb_mod} 。其值大小与线路阻值相关,可在其他条件相同的前提下,仿真比较理想无损线路和实际线路下二者的不平衡差流。在其他误差相同的情况下,前者中 $I_{unb_mod}=0$,而后者含有 I_{unb_mod} ,所以理论上二者的差别即为由线路模型误差引起的不平衡差流,具体见下文仿真。

由于考虑损耗的线路偏微分波动方程很难直接求解,文献[14]给出一种近似考虑线路电阻的分布参数线路模型:将线路分段,线路总电阻 R 作为集中电阻分段串联接入,而每段线路仍以无损分布参数线路处理。近似考虑线路损耗的行波差流为:

$$i_{op}(t) = \left| -i_M(t) + \frac{u_M(t)}{Z} - \frac{1-h}{2} \left[\frac{u_M(t-\tau)}{Z} + \frac{hi_M(t-\tau)}{2} \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{u_N(t-\tau)}{Z} + \frac{hi_N(t-\tau)}{2} \right] \right|$$

(5)

式中: $h=(Z-0.5R)/Z$; $Z=Z_c+R/4$,为考虑线损的等值波阻抗。

若忽略电阻($R=0$),式(5)简化为式(3)。

随着电压等级升高,线路阻抗角增大,电阻分量相对减小,模型误差引起的不平衡差流也随之减小。下文仿真表明,500 kV线路中由模型误差引起的不平衡差流很小,采用式(5)近似考虑线路电阻模型时精度较高,但算法复杂,且两侧数据均要插值,从下文可知会影响其他性能,所以实用时采用基于无损线路的行波差动保护更合适。

2.2 插值截断误差

行波差流表达式(式(3))中,传输时间 τ 通常不是采样间隔 T_s 的整数倍,因而需要进行插值计算,

会产生数值计算截断误差,引起不平衡差流 I_{unb_tr} 。

电流行波主要由正弦信号或可展开为傅里叶级数的信号组成,因此只需研究正弦信号的插值算法截断误差。设电流行波表达式为:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

(6)

式中: I_m 为幅值; ω 为角速度; φ_0 为初相角。

若信号的采样间隔为 T_s ,不失一般性,可令 $t_k=0$,则 $t_{k-1}=-T_s$,代入式(6)中有:

$$\begin{cases} i(t_k) = I_m \sin \varphi_0 \\ i(t_{k-1}) = I_m \sin(-\omega T_s + \varphi_0) \end{cases}$$

(7)

需求取 (t_{k-1}, t_k) 间 $t_{k-\epsilon}$ 处的电流,插值计算得:

$$i_{ch}(t_{k-\epsilon}) = i(t_k) + [i(t_{k-1}) - i(t_k)]\epsilon$$

(8)

式中: $0 < \epsilon < 1$ 。

由式(6)得 $t_{k-\epsilon}$ 处真实电流为:

$$i(t_{k-\epsilon}) = I_m \sin(-\epsilon \omega T_s + \varphi_0)$$

(9)

由于电流行波函数的非线性, $i(t_{k-\epsilon})$ 与插值得到的 $i_{ch}(t_{k-\epsilon})$ 间有一定的截断误差,定义:

$$R(t_{k-\epsilon}) = |i(t_{k-\epsilon}) - i_{ch}(t_{k-\epsilon})|$$

(10)

$R(t_{k-\epsilon})$ 称为电流行波在 $t_{k-\epsilon}$ 处的线性插值误差。

由拉格朗日插值余项公式^[15]可知,随着初相角及插值点 $t_{k-\epsilon}$ 变化,由插值误差产生的最大不平衡差流为:

$$I_{unb_tr} = \frac{1}{8} \omega^2 T_s^2 I_m = 4.93 f^2 T_s^2 I_m$$

(11)

推导过程见附录A。

由式(11)可见, I_{unb_tr} 是采样间隔 T_s 及信号频率 f 的函数,且与电流行波幅值 I_m 相关。表1列出基波和6次谐波在不同采样率下 I_{unb_tr} 与 I_m 的比值, N 为每周期采样点数。可见,对某一频率的信号, I_{unb_tr}/I_m 值随采样率提高成平方倍数减小;而2种不同频率的信号应用同一采样率时,6次谐波对应 I_{unb_tr}/I_m 值为基波的36倍,信号频率的提高大大增加了插值误差引起的不平衡差流。

表 1 不同采样率下的 I_{unb_tr}/I_m 值

Table 1 Value of I_{unb_tr}/I_m under different sampling rates

信号	I_{unb_tr}/I_m			
	$N=12$	$N=24$	$N=48$	$N=96$
基波	0.034 3	0.008 6	0.002 1	0.000 5
6次谐波	1.233 7	0.308 4	0.077 1	0.019 3

2.3 同步对时误差

行波差动保护线路两侧数据必须进行同步处理,常用的有基于通道乒乓对时的数据同步法和全球定位系统(GPS)同步法^[16]。GPS同步法不受电网频率影响,对时精度很高(误差不超过16 μ s),但受自然环境和社会环境等的制约,鉴于继电保护装置的特殊性,该方法不能作为唯一的同步方法;基于

乒乓对时的数据同步法在收、发通道延时不一致情况下,会产生同步对时误差(约 $0.055\text{ ms} \sim 0.220\text{ ms}^{[17]}$),因而在行波差动保护中引起不平衡行波差流 $I_{\text{unb_syn}}$ 。

考虑线路正常运行或区外故障时,令 $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$,设对时误差为 Δt ,因为 Δt 一般很小,故由对时误差引起的不平衡差流为:

$$i_{\text{unb_syn}} \approx i'(t)\Delta t = \omega \Delta t I_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (12)$$

对应不平衡电流的幅值为:

$$I_{\text{unb_syn}} = \omega \Delta t I_m = 6.28 f \Delta t I_m \quad (13)$$

$I_{\text{unb_syn}}$ 与对时误差 Δt 成正比,同时随信号频率升高而增大,并与电流行波幅值相关。表2列出基波和6次谐波在不同对时误差下 $I_{\text{unb_syn}}$ 与 I_m 的比值。可见,在相等的 Δt 下,行波中所含的高频分量会使对时误差引起的不平衡差流成倍增大。

表2 不同对时误差下的 $I_{\text{unb_syn}}/I_m$ 值
Table 2 Value of $I_{\text{unb_syn}}/I_m$ under different synchronization errors

信号	$I_{\text{unb_syn}}/I_m$				
	$\Delta t = 0.025$	$\Delta t = 0.05$	$\Delta t = 0.10$	$\Delta t = 0.15$	$\Delta t = 0.20$
基波	0.007 9	0.015 7	0.031 4	0.047 1	0.062 8
6次谐波	0.047 1	0.094 2	0.188 5	0.282 7	0.377 0

注: Δt 单位为 ms。

2.4 波速不一致的影响

区内故障时,各模分量差流为对应模量中故障点电流 $i_{FY}(\gamma=0, 1, 2)$ 的函数,且与传输时间 τ_{MFY} 相关。以AG故障为例,由于地模分量与空间模量波速不一致($\tau_{MF1} < \tau_{MF0}$),传播过程中波形发生畸变,使保护安装处故障相行波差流 $i_{\text{op}\cdot a}$ 小于故障点电流 i_{Fa} ,非故障相的行波差流不再为0,表达式分别为:

$$\begin{cases} i_{\text{op}\cdot a} = \frac{1}{3}[i_{Fa}(t - \tau_{MF0}) + 2i_{Fa}(t - \tau_{MF1})] \\ i_{\text{op}\cdot b} = i_{\text{op}\cdot c} = \frac{1}{3}[i_{Fa}(t - \tau_{MF0}) - i_{Fa}(t - \tau_{MF1})] \end{cases} \quad (14)$$

故障后,速度较快的空间模量先传到保护安装处,地模分量还未到达,显然非故障相与故障相行波差流比值 $i_{\text{op}\cdot b}/i_{\text{op}\cdot a} = 0.5$,持续时间 $\Delta\tau = \tau_{MF0} - \tau_{MF1}$ 。此后地模分量到达,各相幅值分别为 $I_{\text{op}\cdot a} = \sqrt{5+4\cos\theta}I_{Fa}/3$, $I_{\text{op}\cdot b} = I_{\text{op}\cdot c} = (2I_{Fa}\sin 0.5\theta)/3$,其中 $\theta = 2\pi f\Delta\tau$ 。可见,非故障相的行波差流会随着故障点电流及故障点至保护安装处距离的增大而增大,并与故障电流频率相关。考虑最严重情况,即故障点位于线路末端,对下文仿真中500 kV系统,计算线路长度变化时基波和6次谐波分别对应的非故障相行波差流与故障点电流比值 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{Fa}$,以及非

故障相与故障相行波差流比值 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{\text{op}\cdot a}$,曲线如图1所示。可见,基波和6次谐波对应比值均随线路长度 l 的增大而增大,而 l 相同时,故障电流频率越高,非故障相不平衡差流就越大。当故障电流为基波时, $I_{\text{op}\cdot a} \approx I_{Fa}$,因此曲线 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{Fa}$ 与 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{\text{op}\cdot a}$ 基本重合。

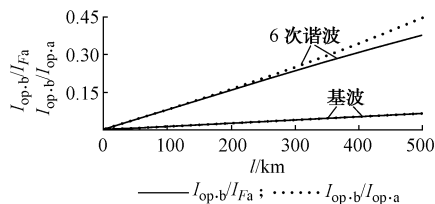


图1 比值 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{Fa}$ 及 $I_{\text{op}\cdot b}/I_{\text{op}\cdot a}$ 随线路长度的变化曲线

Fig. 1 Curves of $I_{\text{op}\cdot b}/I_{Fa}$ and $I_{\text{op}\cdot b}/I_{\text{op}\cdot a}$ versus line length

由图1可见,式(3)定义的反向行波差流在长线路末端金属性故障时,非故障相不平衡差流值相当高,可能会引起行波差动保护的误动作,必须采取有效的应对措施。

3 实用方案研究

本文提出的行波差动保护实用方案逻辑见图2。其中: $\kappa=a, b, c$, 判据式 C_1 是行波差动基本判据, C_2 是比例制动判据, C_3 和 C_5 为防止非故障相误动而设, C_4 为防测量误差或参数误差等而设。下面具体介绍图2中各判据及其有关的技术措施。

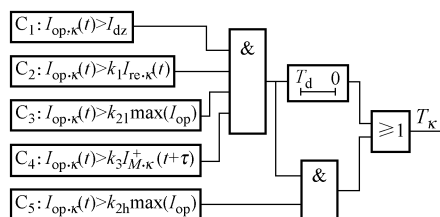


图2 保护逻辑

Fig. 2 Logical diagram of relay protection

3.1 行波差流的构成

行波差流的构成可以是正行波,也可以是反向波,或者二者的组合。保护装设于 M 侧, N 侧信号经通道传至保护处有一定的传输延时 $T_d^{[16]}$ 。以光纤通道为例, T_d 包含两侧光电转换时间和通道传输时间,其值大于行波传输时间 τ 。比较式(2)、式(3)定义的正、反向行波差流可知,相比于正向行波,反向行波差流可提前 τ 获取,具有更快的动作速度。故本文采用反向行波差流构成保护。

式(3)需对 N 侧信号进行插值计算。由上文分析可知,插值误差会受通道传输速率影响,通道速率

越低, 传送信号每周周期点数越少, 插值误差就越大。设 t 为 N 侧传送信号对应时间, 由于通道延时 $T_d > \tau$, N 侧 t 时刻信号到达时, 本侧 $t + \tau$ 时刻数据已采样得到, 因此式(3)可进一步表示为:

$$I_{op}(t) = |\bar{I}_M(t + \tau) - \bar{I}_N(t)| \quad (15)$$

式(15)只需对本侧数据插值, 对侧数据无需处理而直接调用, 因而大大降低了对通道速率的要求。

3.2 比例制动特性

线路正常或区外故障时, 几方面因素会产生不平衡差流, 若通过提高最小动作电流 I_{dz} 来防止保护误动, 势必影响区内故障灵敏度。由于插值、对时误差等引起的不平衡差流均与电流行波成正比, 因此可参考常规差动保护引入行波电流制动量, 构成行波差动比例制动判据。行波制动电流定义为:

$$I_{re}(t) = |\bar{I}_M(t + \tau) + \bar{I}_N(t)| \quad (16)$$

线路内部无故障时, 行波制动电流为 2 倍电流行波值, 能有效防止不平衡差流引起的保护误动。

图 2 中分相判据式 C_1 和 C_2 分别为:

$$I_{op,\kappa}(t) > I_{dz} \quad (17)$$

$$I_{op,\kappa}(t) > k_1 I_{re,\kappa}(t) \quad (18)$$

式中: I_{dz} 为最小动作门槛; k_1 为比例制动系数。

式(18)用于防止线路正常、区外故障或空充时插值、对时等误差引起的保护误动。值得强调的是, 常规差动保护在线路空充时仅一侧有电流, 比例制动特性失效, 故 I_{dz} 必须躲过此不平衡差流; 而行波差动保护由于制动电流中引入电压量, 线路空充时仍有较大的制动作用, 只要选择合适的 k_1 , 保护不会误动。由于行波差动保护从原理上无需躲过电容电流及线路空充等的不平衡, 因而理论上可以取 $I_{dz} = 0$, 实用时按保护灵敏度要求整定, 大大降低了保护门槛; 比例制动系数 k_1 按线路正常、区外故障和线路空充时差流与制动电流的最大比值来确定。

3.3 消除波速不一致和测量误差影响的措施

区内故障时改进式(15)为 $I_{op}(t) = |\dot{I}_F(t + \tau_{NF})|$, 类似 2.4 节分析可知, 波速不一致在非故障相引起不平衡差流, 尤其当 M 侧出口金属性故障时其值较大。由图 1 可见, 对于 400 km 线路, 6 次谐波对应非故障相差流达到故障电流的 0.31 倍, 即使滤波后基波仍为故障电流的 0.054 倍, 可通过抬高 k_1 来防止非故障相误动, 但这会影响保护的快速性和灵敏性。按 2.4 节对非故障相与故障相行波差流关系的分析, 引入图 2 的判据式 C_3 和 C_5 分别为:

$$I_{op,\kappa}(t) > k_{21} \max(I_{op}(t)) \quad (19)$$

$$I_{op,\kappa}(t) > k_{2h} \max(I_{op}(t)) \quad (20)$$

式中: $\max(I_{op})$ 为取三相差流最大值; k_{2h} 和 k_{21} 分别为高、低系数值, 其中 k_{2h} 对应空间模量已到而地模

分量未到 $\Delta\tau$ 时段, 考虑一定裕度取 0.6, 而 k_{21} 对应地模分量到达之后, 其值与线路长度有关。

由图 1 可见, 对于 500 km 内的线路, 滤波后非故障相与故障相行波差流比值不超过 0.067, 考虑裕度后取 0.1; $\Delta\tau$ 不超过 0.51 ms, 故延时 T_d 很短, 建议取 2 ms ~ 3 ms。

线路 M 侧反向出口故障时产生向右的故障正向行波, 到达 N 侧母线前, 理论上两侧故障反向行波均为 0; 若 N 处波阻抗连续, 则在更长时间内为 0。然而实用时, 受互感器测量误差^[18]和线路参数误差等的影响, 应用时, 式(15)有一定的不平衡量, 尽管其值很小, 但比例制动判据无法制动, 为此采用下式防止保护误动:

$$I_{op,\kappa}(t) > k_3 I_{M,\kappa}^+(t + \tau) \quad (21)$$

即用 M 侧对应相的正向电流行波 $I_{M,\kappa}^+$ 作为制动量, k_3 为系数。上述不平衡产生时, 故障正向行波已到达 M 处, 故能可靠制动。由于此不平衡量较小, 所以 k_3 取值不大, 本文取 0.1。需要说明的是, 此问题不是反向行波判据所独有, 采用正向行波或将正、反向行波相结合的判据也会存在同样的问题, 也需要采取相应措施, 限于篇幅, 具体分析略。

3.4 滤波技术和采样率的要求

区外故障和线路空充暂态电流、电压中含有丰富的谐波分量, 使电流行波含有大量的高频分量, 而插值、对时误差引起的不平衡差流以及区内非故障相不平衡差流均对暂态高频分量非常敏感, 会随信号频率升高而急剧增大。若采用瞬时值, 仅靠式(18)~式(20)来躲, 势必造成门槛高, 降低保护的灵敏度, 此外对保护的技术条件要求很高, 使得现有技术下难以实现, 或丧失行波差动的优越性, 因此本文不用瞬时值, 而采取必要的滤波技术。在分布参数电路中, 电流、电压无论是负荷分量还是故障分量, 均以行波方式传播。利用行波差流中任何时间段和任何频率段的故障信息, 均能有效识别故障。对行波差流进行滤波不会引起保护的误判, 却能有效减小不平衡差流。因此, 可采取适当的滤波措施, 只选取某个频率(或频率段)的故障信息进行判别, 以获取更好的装置综合指标。

滤波的目的是在现有条件下尽量降低门槛, 提高区内故障灵敏度。采用本文方案, 躲不平衡差流主要靠比例制动系数 k_1 。 k_1 大小与滤波算法有关, 数据窗较长时 k_1 可以取得较低。区内故障时, 各侧行波电流中包含负荷分量和故障分量, 负荷分量体现在制动电流中, 故障分量形成差流。随着数据窗的移动, 故障后信息增多, 负荷分量的制动作用逐渐减小, 而差流不断增大, 当差流与制动电流比值超过

门槛时, 差动保护动作。因此, 保护动作速度取决于该比值上升速度及 k_1 的高低。数据窗短时, 比值上升较快, 但是门槛高^[13]; 数据窗长时情况相反。差动保护并不需要数据窗满才投入, 在过渡窗内就可以投。数据窗长时由于比例系数低, 故区内故障能够很快满足式(18)而快速动作。因而采用较长数据窗并不会影响区内故障的速度, 却可以提高灵敏度, 因此, 本文采用全波傅里叶算法。

通道传送速率与通信介质相关, 目前常用的为 64 kbit/s 或 2 Mbit/s 速率光纤通道; 采样率取决于装置本身, 通常能多于通道所传数据。式(15)行波差流只需对本侧数据插值, 理论上对通道速率没有要求(不考虑动作速度受影响), 在现有通道上能获得良好应用。而提高本侧采样率能大大减小插值误差, 降低不平衡差流。实用时可综合装置硬件水平和保护需求来选择合适的采样率。对 64 kbit/s 速率通道, 建议装置每周期采样 $N_1=24$ 或 48, 通道每周期传送 $N_2=12$; 而对于 2 Mbit/s 速率通道, 可选取 $N_1=48$, $N_2=24$, 从而进一步加快动作速度, 提高保护性能。

值得说明的是, 行波差动保护与以前接触较多的行波方向保护、行波距离保护(或行波测距)有本质上的差别。行波方向保护等通常利用故障初始极短时间内的行波特征才能正确反应故障, 因此需很高的采样率去“抓”故障行波波头, 不能采用严格的滤波措施, 且受故障电压角影响。由此造成行波差动保护也具有这个特点的印象, 但依上文分析可知, 行波差动保护并不存在这些局限性。可能也是为了避免概念上的误区, 国内有的行波差动保护研究文献中, 称之为“基于贝瑞隆模型的线路差动保护”^[13]。实际上, 贝瑞隆法只是行波计算的一种常见方法, 其差动保护原理与行波差动是一样的。考虑到国内外关于行波差动保护已有大量的研究成果可借鉴, 本文仍沿用原来的行波差动保护名称。

4 仿真分析

通过仿真计算来验证本文结论, 在 EMTP 仿真程序中建立 500 kV 系统模型如图 3 所示。

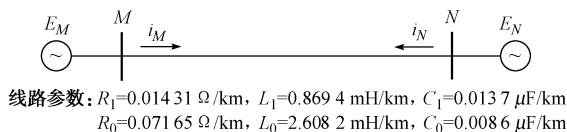


图 3 500 kV 系统仿真模型
Fig. 3 Model of 500 kV power system

系统阻抗为 $Z_{m1} = 83.09 \angle 88^\circ \Omega$,

$Z_{n0} = 87.49 \angle 88^\circ \Omega$, $Z_{n1} = 250.3 \angle 88^\circ \Omega$, $Z_{n0} = 126.5 \angle 88^\circ \Omega$, 线路全长为 400 km, 线路参数见图 3。保护位于 M 侧, 计算得线路 MN 上的行波传输时间为 $\tau = 1.4$ ms, $\tau_0 = 1.9$ ms。

首先研究模型误差引起的不平衡差流。设通道每周期传送 24 点, 两侧数据同步, 图 4 为 N 侧区外 AG 时采用不同线路模型的行波差流曲线。其中, “忽略 r ”为实际线路, 采用式(3)忽略电阻模型; “考虑 r ”为式(5)近似考虑电阻模型; “ $r=0$ ”表示仿真系统为理想无损线路。

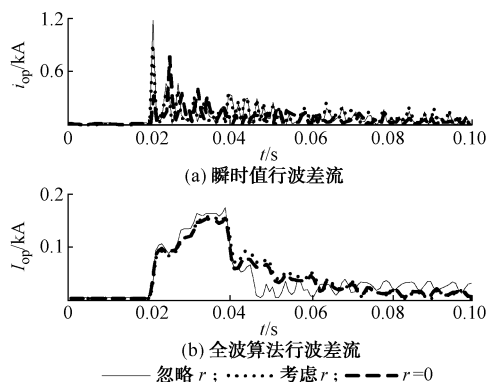


图 4 不同线路模型下的行波差流曲线
Fig. 4 Differential current under different line models

图 4(a) 中, 由于不平衡差流对区外故障产生的高次谐波非常敏感, 故障发生后瞬时值行波差流很大, 如“忽略 r ”最大值达到 1.19 kA, 暂态过程中随着高次谐波衰减, 不平衡差流值逐渐减小。线路空充时谐波含量较大且衰减缓慢, 瞬时值行波差流在合闸后较长时间内维持较高的值, 情况更严重。因此, 为减小不平衡差流必须采取滤波措施。与半波傅里叶算法相比, 全波算法可获得更低的门槛值, 区内故障时动作速度较快, 因此选用全波傅里叶算法^[13]。

由图 4(b) 可见, “ $r=0$ ”对应无损线路与行波差动原理上一致, 不平衡差流最小, 故障前 I_{op} 为 4 A, 故障后最大值为 156 A; “考虑 r ”模型采用集中电阻近似等效线路电阻, 不平衡差流在故障前后均与 “ $r=0$ ”接近; “忽略 r ”中因线路模型误差, 故障前 I_{op} 为 6 A, 故障后最大为 172 A, 与 “ $r=0$ ”相差也不大。比较可知, 基于无损线路的行波差动保护用于实际线路时, 模型误差引起的不平衡差流不大, 而式(5)考虑电阻的模型尽管能近似消除模型误差, 但算法复杂, 且因为两侧数据均要插值, 对通道要求增加, 所以实用时采用基于无损线路的行波差动判据更合适。

采用传统的行波差动保护时, 即使 $\Delta t = 0$, 由

图4可见, 区外故障由插值误差等引起的不平衡差流仍较大, 从而使门槛较高而影响灵敏度。接下来验证本文方案。式(3)转化为式(15)后, 只需对本侧数据进行插值, 因而可在相同的通道条件下, 通过提高装置采样率来减小插值误差以降低不平衡差流。由于GPS同步法的不确定性, 验证时假设两侧数据为乒乓对时, 误差 $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$, 通道传送的 N 侧信号仍为每周期24点, 装置采样率提高1倍, 即 $N_1 = 48$ 。

图5为 N 侧区外AG时采用本文改进方案得到的A相曲线。由于对时误差较大, 图5(a)中正常运行时 $I_{\phi} \approx 72 \text{ A}$, 故障后暂态 I_{ϕ} 最大达151 A, 若采用传统的单一判据行波差动保护原理, 则门槛值仍较高; 图5(b)中, 差流与制动电流的比值 m 很小, 故障前仅0.028, 故障后最大为0.059, 故采用式(18)比例制动判据, 区外故障时防误动的制动系数 k_1 可取得很低, 不影响区内故障的灵敏度。

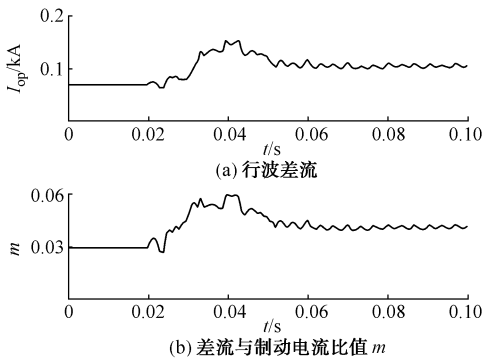


图5 区外故障
Fig. 5 External fault

为便于比较, 采用实用方案对 N 侧区外AG且 $\Delta t = 0$ 也进行了仿真, 故障后 I_{ϕ} 最大为83 A。与图4(b)对比可知, 相同的通道速率下, 实用方案使差流最大值由172 A减小为83 A, 减小了52%, 从而大大有利于保护门槛值的降低。

系统 N 侧断开, M 侧空载合闸的仿真结果见附录B。合闸后暂态 I_{ϕ} 最大为166 A, 由于引入的制动电流含电压量, 使得空充时制动量较大, 合闸后暂态 m 最大仅为0.099, 且之后迅速减小。

为考察区内故障时判据灵敏度, 图6示出 N 侧300 Ω 高阻AG时行波差流及 m 值曲线。故障前与图5一致, 故障后A相行波差流和 m 值单调快速上升, 故障后4 ms差流就达到280 A, m 值达到0.14, 稳态后分别约为1.47 kA和0.65, 因此区内高阻故障后, 行波差动保护实用判据能够快速灵敏动作。对区内金属性故障也进行了仿真, 结果见附录C。可见, 采用判据式(19)能有效防止非故障相误动, 确

保装置的选相跳闸能力。

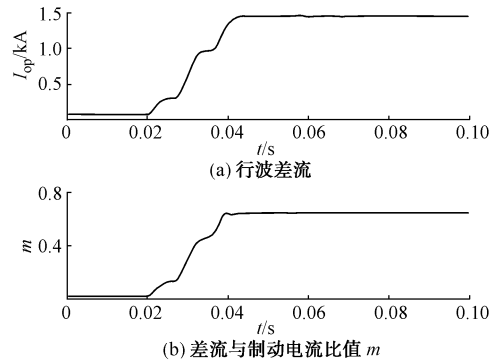


图6 区内高阻故障
Fig. 6 Internal fault with high resistance

综上所述, 两侧采用乒乓对时(Δt 较大)情况下, 依照仿真结果并考虑裕度, 可以将 k_1 确定为0.12~0.15, 即只需较小的制动系数 k_1 , 就能有效躲过区外故障、线路空充的不平衡差流。 k_2 和 k_3 值见上文; I_{dz} 理论上可取0, 实用时按灵敏度要求整定, 大大降低了门槛值。

5 结论

1) 本文定义的行波方向下, 反向行波差动保护动作速度快于正向行波判据, 具有更大的优势。

2) 线路模型误差导致的不平衡较小, 无需修正; 插值误差、对时误差及波速不一致引起的不平衡对暂态高频分量非常敏感, 实用时需滤波处理。

3) 在现有通道基础上, 提高装置采样率能大大降低插值误差引起的不平衡差流。

4) 插值误差、对时误差引起的不平衡与电流行波成正比, 可构成比例制动判据防止保护误动。

5) 本方案能有效防止区外故障、线路空充时误动, 区内故障能快速灵敏动作, 有很强的选相跳闸能力, 具有良好的应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps.info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9-13.
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, ZHANG Zhe. Study on a new differential protection for transmission line. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13.
- [2] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研究. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53.

- [3] 林湘宁, 刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 27-31.
LIN Xiangning, LIU Pei. Comparative studies on percentage differential criteria using phase current and superimposed phase current. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 27-31.
- [4] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.
WU Yekai, ZOU Dongxia. The influence of capacitance current to differential protection and its compensation scheme. Relay, 1997, 25(4): 4-8.
- [5] 郑玉平, 吴通华, 丁琰, 等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 50-55.
ZHENG Yuping, WU Tonghua, DING Yan, et al. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron model. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 50-55.
- [6] 索南加乐, 张泽宁, 齐军, 等. II 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
SUONAN Jiale, ZHANG Yining, Qi Jun, et al. Study of current differential protection using time domain capacitive current compensating algorithm on II model. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [7] JOHNS A T. New ultra high speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines. IEE Proceedings C, 1980, 127(4): 228-239.
- [8] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 等. 输电线路行波保护的现状与展望. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 56-61.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali, et al. Status quo and prospect of travelling waves protection of transmission lines. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 56-61.
- [9] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yaozhong. New types of protective relaying and fault location: their theory and techniques. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [10] TAKAGI T, BABA J, UEMURA K, et al. Fault protection based on travelling wave theory: Part I theory // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Jul 17-22, 1977, Mexico City, Mexico: 750-753.
- [11] TAKAGI T, BABA J, UEMURA K, et al. Fault protection based on travelling wave theory: Part II sensitivity analysis and laboratory test // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jan 29-Feb 3, 1978, New York, NY, USA: 220-226.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章, 等. 基于小波变换的行波差动保护. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 25-29.
SU Bin, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang, et al. Traveling wave differential protection based on wavelet transform. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 25-29.
- [13] 张武军, 王慧芳, 何奔腾. T 接线行波差动保护. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 64-66.
ZHANG Wujun, WANG Huifang, HE Benteng. Traveling wave differential protection on teed transmission lines. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 64-66.
- [14] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiple networks. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 388-399.
- [15] 易大义, 沈云宝, 李有法. 计算方法. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
YI Dayi, SHEN Yunbao, LI Youfa. Numerical calculation method. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1989.
- [16] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理. 增订版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jiali, SONG Congju. Protective relaying theory of power system. Rev ed. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [17] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 基于 GPS 的电流纵差保护设计及试验. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 64-65.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Design and testing of GPS based current differential protection. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 64-65.
- [18] 李一泉. 电容式电压互感器 (CVT) 对超 (特) 高压输电线路保护影响的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LI Yiquan. Study of CVT's influence on relay protection in UHV/EHV transmission line [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

张武军(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究. E-mail: zhgwj00@sina.com

何奔腾(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和控制的研究.

Analysis and Application of Unbalanced Differential Current in Traveling wave Differential Protection

ZHANG Wujun, HE Benteng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Traveling wave differential protection has a special advantage in EHV/UHV transmission line protection for its immune ability to distributed capacitive current. However, unbalanced differential current can occur at normal conditions when traveling wave differential protection is applied. In this paper, four main factors affecting unbalanced differential current are investigated theoretically. They are line resistance model error, interpolated truncation error, data synchronization error and unequal traveling speed between earth sequence and spatial sequence. An applied scheme for traveling wave differential protection is also proposed in the paper. The filtering algorithm and sampling rate in application are also discussed. EMTP simulation results show that the proposed scheme operates sensitively, rapidly and selectively, demonstrating good potential in field applications.

Key words: traveling wave differential protection; model error; interpolated truncation error; synchronization error; unbalanced differential current.