

交流特高压输电线路行波差动保护研究

刘新军¹, 方健美², 周仁才³, 徐思敬²

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波市北仑区供电公司, 浙江 宁波 315800; 2. 浙江东禾工程设计有限公司, 浙江 宁波 315040; 3. 国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 为了有效解决传统行波电流差动保护无法满足带高压并联电抗器特高压输电线路应用要求的问题, 提出了一种新的行波差动保护方法。通过计算三相电压、三相电流暂态量, 经过相模解耦变换, 得到行波电流模分量; 然后以线路两端初始方向电流行波波头在前数十微秒内的积分作为特征值构成新的保护动作判据。该判据能够有效地躲过系统正常运行和区外故障引起的暂态不平衡差流, 同时对区内各种故障都有较高的灵敏度。理论及仿真计算表明, 该方法动作可靠, 速度快, 能够在现有的技术条件下实现, 具有较高的实用价值。

关键词: 电力系统; 行波差动保护; 交流特高压; 高压并联电抗器; 相模解耦变换

Study on traveling-wave differential protection of UHV AC transmission line

LIU Xinjun¹, FANG Jianmei², ZHOU Rencai³, XU Sijing²

(1. Ningbo Beilun Power Company, Ningbo 315800, China; 2. Zhejiang Donghe Engineering Design Co., Ltd., Ningbo 315040, China; 3. State Grid Ningbo Electric Power Supply Company, Ningbo 315000, China)

Abstract: In order to effectively solve the question of the traditional traveling-wave differential protection cannot be applied to UHV AC transmission line with high voltage shunt reactor, a new method of traveling-wave differential protection is proposed. Obtaining three-phase voltage and current transients, module components are got by decoupling transformation, then the integral value of initial wave fronts at both of the line terminals for tens micro seconds is taken as eigenvalues which compose the action criterion. The application of the criterion not only avoid transient unbalance differential currents impacts under the system normal operation and external faults conditions, but also has high sensitivity for all internal faults. Theoretical analysis and Matlab simulation show that the method presented is reliable as well as with rapid response. The new protection has high practical value, can be achieved under the existing technical conditions.

Key words: power system; traveling-wave differential protection; UHV AC; high voltage shunt reactor; decoupling transformation

0 引言

特高压交流输电系统凭借输送容量大、输电距离长和线路损耗小等优点, 为实现电力资源跨区域分配, 保障电力供应总体平衡创造了有利条件。当前, 我国特高压智能电网

即将进入大规模建设的新阶段, 任务非常艰巨。因此, 需要针对新的1 000 kV电压等级带来的各种问题进行全面的研究和分析^[1-2]。

不同于一般的高压和超高压线路, 特高压线路自然功率大, 波阻抗小, 线路的分布

电容电流大幅度增加,因此如何在此背景下保证继电保护快速正确地动作成为当前亟待解决的问题。

传统的行波差动保护由于其在理论上能够完全消除电容电流的影响,动作速度快,不受过渡电阻的影响,可以从原理上解决传统的工频量保护所不能解决的理论和技术问题^[3]。但是,在实际特高压线路中,为补偿容性无功、消除特高压输电线路的电容效应以及限制工频过电压而引入的高压并联电抗器,会使传统的行波差动保护原理在特高压线路上不再成立。因此,必须对其进行改进或寻找其他更合理的保护方式^[4-6]。

文献[7]提出一种具有轻微比例制动特性的保护方案,具有很高的灵敏度,且对采样频率和通信速率没有过高的要求。文献[8]利用故障行波波头的积分差构成一种可使保护可靠动作的新算法,动作速度快。文献[9]充分利用初始行波波头信息,用多分辨形态梯度变换提取波头模极大值,并设计了一种新型形态滤波器对信号进行前置滤波,提出一种形态综合算法,该算法简单有效,通信量少,容易实现。文献[10]和文献[11]利用行波波头这一关键的故障信息,提出基于小波变换的行波差动保护原理和算法,减少了通信量,提高了保护的灵敏度和可靠性,但其计算复杂,且需要很高的采样频率,在现有的技术条件下很难实现。基于贝瑞隆模型的差动保护采用分布参数模型,在原理上不受电容电流的影响,但其对采样频率和通信速率的要求都很高,仍受现有技术条件所限制^[12-16]。

目前,新型继电保护的发展趋势是高速化和智能化^[17-18]。本文根据差动保护原理,在现有研究成果的基础上,进行了深入分析,提出一种适用于特高压带高压并联电抗器线路的行波差动保护新方法。分析了在系统正常运行、区外故障和区内故障情况下的电流,采用两个门槛值以获取保护动作阈

值,使保护动作更加可靠,且算法简单,对采样频率和通信速率没有过高的要求,动作速度快。

1 行波差动保护的概述

行波差动保护基本原理可用如图1所示的单相无损线路进行说明。

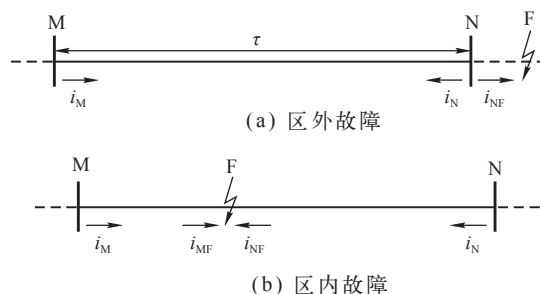


图1 单相无损线路行波示意图

Fig. 1 Traveling-wave on single-phase lossless line

行波差动保护的基本工作原理是:由线路一端出发的行波延时一个线路全长的传输时间 τ 后到达另一端,行波的形状及大小不变。线路MN两端电流行波的波动方程为

$$\begin{cases} \bar{i}_M^+(t) = i_M(t) + u_M(t)/z_c \\ \bar{i}_M^-(t) = -i_M(t) + u_M(t)/z_c \\ \bar{i}_N^+(t) = i_N(t) + u_N(t)/z_c \\ \bar{i}_N^-(t) = -i_N(t) + u_N(t)/z_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_M^+ 、 i_M^- 、 i_N^+ 和 i_N^- 分别为M、N侧正、反方向电流行波。

当系统正常运行或区外故障时,如图1a所示,线路两端电流行波的波动方程满足

$$\begin{cases} \bar{i}_M^+(t-\tau) - \bar{i}_N^-(t) = 0 \\ \bar{i}_N^+(t-\tau) - \bar{i}_M^-(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当系统区内故障时,如图1b所示,由于故障节点F的存在,式(1)关系被破坏,式(2)不再成立,线路两端电流行波的波动方程满足

$$\begin{cases} \bar{i}_M^+(t-\tau) - \bar{i}_N^-(t) = i_F(t-\tau_{MF}) \\ \bar{i}_N^+(t-\tau) - \bar{i}_M^-(t) = i_F(t-\tau_{MF}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, τ_{MF} 为M端到故障点F之间线路对应的行波传输时间; $i_F(t-\tau)$ 为短路点的短路电流。

因此,行波差动保护的判据可表示为

$$|\bar{i}_M^+(t-\tau) - \bar{i}_N^-(t)| > I_{op} \quad (4)$$

或

$$|\dot{i}_N^+(t-\tau) - \dot{i}_M^-(t)| > I_{op} \quad (5)$$

式中, I_{op} 为行波差动保护的動作電流值。

因此, 可以根据行波差动电流的大小判断区内是否发生故障。

实际三相输电系统中, 暂态分量的各相不独立, 波过程的求解变得十分困难, 因此把三相系统变换成三个独立模量, 变换后的模量能正确反映电力系统的各种运行工况^[19-20]。

由于对称分量变换存在复数, 计算起来较复杂, 影响保护动作速度。Clarke变换不存在复数计算, 但该变换不能反映BC或AG短路故障。因此要在保护动作的可靠性和速度方面做作出选择, 这要视系统对保护的要求而定。由于特高压系统对保护的動作速度要求更为突出, 所以本文选择Clarke变换解耦, 除了BC或AG短路故障外, 其他故障保护都能快速动作, 而在发生BC或AG短路故障时, 可以借助系统的其他保护来切除故障, 只是降低一些可靠性。Clarke变换矩阵为

$$[Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此, 模电流 i_α 、 i_β 和 i_0 与相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [Q]^{-1} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于0模分量随着频率升高衰减很严重, 所以选取模分量作为检测对象 (该模量不能反映BC相间短路故障)。

2 新的行波差动保护原理

传统的行波差动保护需要实时传输每个采样点到对端, 如果采样率较高, 虽然获得的行波信号特征比较全面, 但传输量将非常大, 不利于保护的速动性; 而采样率较低时, 虽然传输的信息量较少, 但采集的行波信号将不再完整。本文利用方向电流行波波

头部分较短时间内的积分作为特征值构成新的保护动作判据, 其保护原理如下。

2.1 系统正常运行

只有系统发生故障时才会产生高频行波, 系统正常时, M端和N端都检测不到行波, 行波差动保护不会起动, 据此可判断系统正常运行。

2.2 区外故障

以M端为例, 定义反方向故障时, M端提取先到达保护安装处的初始正向行波波头的积分为正向特征值, N端提取反向行波波头的积分值; 正方向故障时, M端提取先到达保护安装处的初始反向行波波头的积分为反向特征值, N端提取正向行波波头的积分值。当M端反方向发生故障时, 由于高压并联电抗器的存在, M端提取的正向特征值与N端提取的反向电流行波波头的积分值大小不相等, 有一定的偏差, 但偏差很小, N端反向电流行波比M端正向电流行波到达时刻延时了一个线路全长的传输时间 τ (M端正方向区外发生故障与M端反方向故障类似); 线路MN内部发生故障时, M端提取反向电流行波波头的积分, 由于此行波对N端来说是正向的, 假设其是由N端传到M端的, 那么M端提取的反向特征值与N端提取的正向电流行波波头的积分值偏差应很小, 但实际上, 偏差较大, 且到达时刻相差时间小于 τ 。根据这一区别, 构成新的行波差动保护方案。

M端反方向发生故障时, M端先检测到正向电流行波 (无反向电流行波)。当M端检测到故障行波时, 保护起动并记录下最先到达M端的行波波头所对应的时间 (如 t_1), 提取故障行波, 对该行波波头进行 Δt 时间的积分 (正向特征值)

$$\dot{i}_M^+(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \dot{i}_M^+(t) dt \quad (8)$$

式中, Δt 一般取 $20 \sim 30 \mu s$ 。

N端在 t_2 时刻同时检测到正、反向电流行

波, 该端保护在 t_2 时刻起动并对反向电流行波波头同样进行 Δt 时间的积分, 即

$$\bar{i}_N(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} \bar{i}_N(t) dt \quad (9)$$

式中, $|(t_1+\tau) - t_2| \leq \Delta t_0$; Δt_0 为允许时间误差。

按传统行波差动保护原理式(2)有

$$\bar{i}_M^+(t_1) - \bar{i}_N^-(t_2) = 0 \quad (10)$$

式中, 等号左侧可以理解成M端的正向电流行波无衰减地运动到N端, 因此该行波相应波段在 Δt 时间内的积分差为0。但对有并联电抗器的输电线路, 行波传输到并联电抗器时, 会发生折射和反射, 式(2)将产生不平衡差流, 即

$$\bar{i}_M^+(t-\tau) - \bar{i}_N^-(t) \neq 0 \quad (11)$$

所以该行波相应波段在 Δt 时间内的积分差值将不为0, 即

$$\bar{i}_M^+(t_1) - \bar{i}_N^-(t_2) \neq 0 \quad (12)$$

M端将时间 t_1 和方向特征值发送给N端, 同时接受N端传来的相应信息, M端保护判断 $|(t_1+\tau) - t_2| \leq \Delta t_0$ 是否成立, 若成立, 则进行式(13)的判据计算

$$\left| 1 - \frac{\bar{i}_N^-(t_2)}{\bar{i}_M^+(t_1)} \right| \leq \varepsilon_1 \quad (13)$$

式中, ε_1 为系统外部故障时的门槛值, 整定时应考虑高压并联电抗器、行波传输过程中的衰减以及保护装置的测量和计算误差等因素的影响。

M端正方向区外故障时的保护原理与M端反方向故障时的保护原理相同, 此处不再赘述。

2.3 区内故障

系统内部发生故障时, M、N两端分别在 t_1 和 t_2 时刻检测到正、反向电流行波。当检测到故障行波时, 其保护启动并记录下行波波头的到达时间, 提取故障行波, 分别对反向电流行波和正向电流行波波头进行 Δt 时间的积分, 即

$$\bar{i}_M^-(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \bar{i}_M^-(t) dt \quad (14)$$

$$\bar{i}_N^+(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} \bar{i}_N^+(t) dt \quad (15)$$

式中, $|t_1 - t_2| \leq \tau$ 。

按照行波差动保护基本原理, 由于系统内部短路点以及高压并联电抗器的存在, 会使M端反向特征值与N端正向电流行波波头的积分差值很大, 和系统正常运行、区外故障时有明显的区别, 故可用下式进行判别, 即

$$\left| 1 - \frac{\bar{i}_N^+(t_2)}{\bar{i}_M^-(t_1)} \right| \geq \varepsilon_2 \quad (16)$$

式中, ε_2 为系统内部故障时的门槛值。

若式(16)成立, 且 $|t_1 - t_2| \leq \tau_0$, 则判为内部故障。

综上所述, M端可以得到两个门槛值 ε_1 、 ε_2 , 令M端的保护动作阈值为 δ , 其中

$$\varepsilon_1 \leq \delta \leq \varepsilon_2 \quad (17)$$

可根据 ε_1 、 ε_2 的取值及系统对可靠性的要求, 合理地选取 δ 阈值, 当系统的 ε 值小于 δ 时, 则判为系统外部发生故障, 否则系统内部发生故障。N端保护动作阈值的选取与M端相同, 此处不再赘述。

3 行波的提取

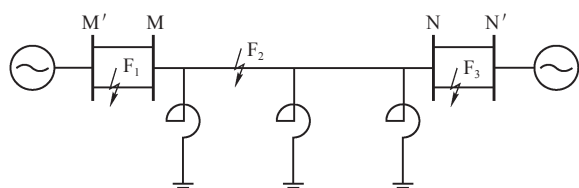
在M、N两端提取三相电压和三相电流; 用故障后一段时间内的三相电压值、三相电流值减去故障前相应一段时间内的三相电压值、三相电流值, 得到三相电压和三相电流的暂态量; 利用式(7)对三相电压、三相电流的暂态量进行Clarke变换, 得到 α 、 β 、 θ 模电压和模电流分量(本文只求 α 模电压和模电流分量即可); 利用式(1)计算M、N两端正、反向电流行波。

4 仿真实验

4.1 仿真系统与参数

采用如图2所示的两端输电系统对文中所提出的新原理在特高压带高压并联电抗器输电线路中的应用进行仿真验证。系统电压等级为1 000 kV, M端电源超前N端 30° , 线路M'M、MN和NN'分别为150 km、640 km和150 km, F₁、F₂点分别距M端100 km、200 km。线路

MN的首端、中间和末端分别装设高压并联电抗器, 补偿容量分别为960 Mvar、1 440 Mvar和600 Mvar, 补偿度为85%, 具体线路参数如图2所示。由参数计算可得波阻抗 $Z_1=247 \Omega$, $Z_0=649 \Omega$, 传输时间 $\tau_1=2.18 \text{ ms}$, $\tau_0=3.54 \text{ ms}$ 。利用Matlab, 按照上述条件搭建系统仿真模型, 分别模拟系统正常运行、区外故障和区内故障情况, 采样频率为0.1 MHz。



线路正序参数: $r_1=0.008\ 04 \Omega/\text{km}$, $l_1=0.839\ 77 \text{ mH}/\text{km}$,
 $c_1=0.013\ 78 \mu\text{F}/\text{km}$
 线路零序参数: $r_0=0.151\ 23 \Omega/\text{km}$, $l_0=3.593\ 1 \text{ mH}/\text{km}$,
 $c_0=0.008\ 52 \mu\text{F}/\text{km}$

图2 输电线路带并联电抗器系统模型

Fig. 2 System model of transmission line with shunt reactor

4.2 系统正常运行

以M端捕捉系统正常运行和区内故障(AB相间故障)时的电流行波波头为例进行说明。系统正常运行和区内故障时, M端提取的电流行波分别如图3a、c所示, 对该行波进行式(18)所示的差分运算, 得到各采样时刻的差分值为

$$\Delta i_M(n) = i_M(n) - i_M(n-k) \quad (18)$$

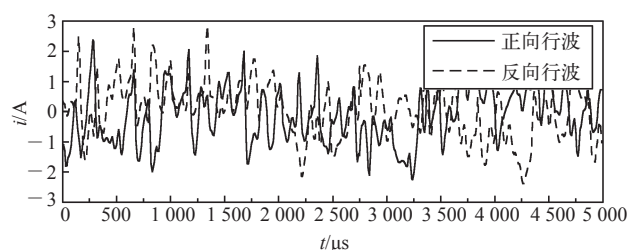
式中, k 的取值根据波形的采样频率而定。

本文 k 取10, 所以图3b、d的数据窗长度相当于 $10 \mu\text{s}$ 。通常要求数据窗长度越短越好, 但高准确度与快速动作之间存在着矛盾, 一般要根据实际需要进行协调以得到最合理的结果。

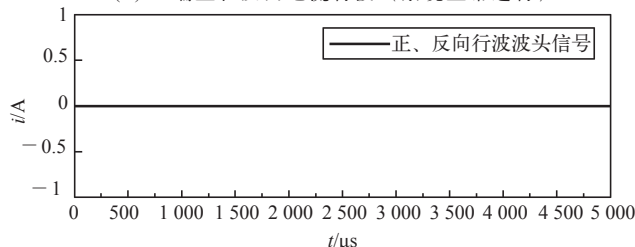
令 $\Delta i_M(n)$ 值相比系统额定电流值的5%低的相为零, 就得到图3b、d的模极大值图, 通过图3b与图3d的比较可知, 系统正常运行时捕捉不到行波波头, 据此可判断系统未发生故障。

4.3 区外故障

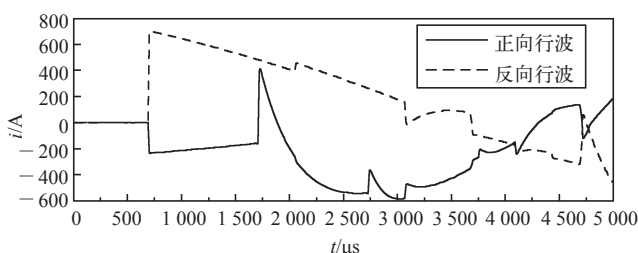
当M端反方向 F_1 点发生故障(如AB相间



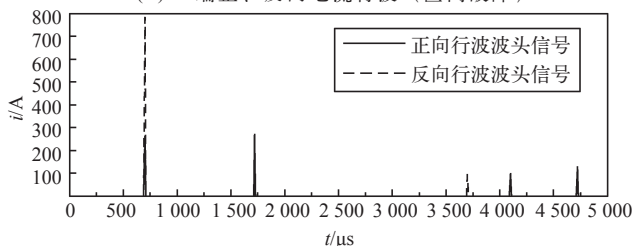
(a) M端正、反向电流行波 (系统正常运行)



(b) M端正、反向电流行波波头捕捉结果 (系统正常运行)



(c) M端正、反向电流行波 (区内故障)



(d) M端正、反向电流行波波头捕捉结果 (区内故障)

图3 波头捕捉

Fig. 3 Waves head detection

故障)时, 提取行波, 可得到M、N两端 α 模方向电流行波, 如图4所示。

由图4可知, 当 F_1 点发生故障时, 正向电流行波先于反向电流行波到达M端(无反向电流行波), 而在N端, 正、反向电流行波同时到达。记录线路两端行波波头的到达时间, 经理论计算可知, F_1 点发生故障后, 正向电流行波经过 $340.14 \mu\text{s}$ 到达M端, 正、反向电流行波经过 $2\ 517.11 \mu\text{s}$ 到达N端。

计算M端正向电流行波波头 $20 \mu\text{s}$ 宽波形的积分模值(正向特征值)和N端反向电流行波波头 $20 \mu\text{s}$ 宽波形的积分模值。实际应用时

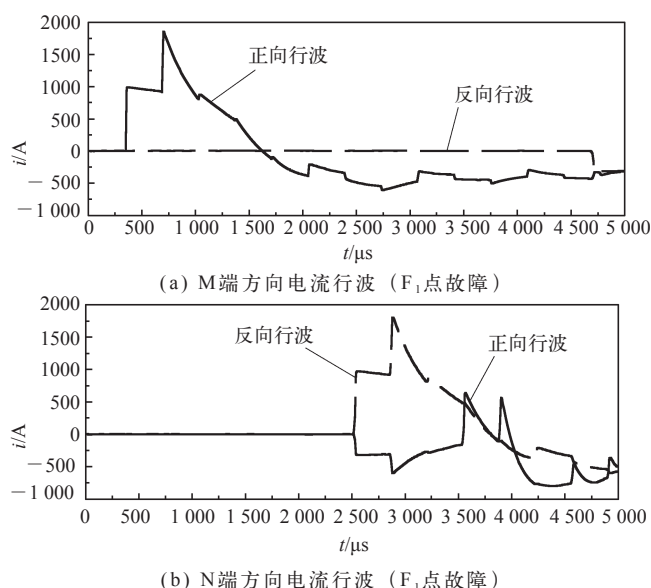


图4 外部故障时M、N两端的电流行波

Fig. 4 Waves at both terminals of line MN when external fault occurs

为了计算简便,用方向电流离散值的和代替积分值,本文中即对电流行波的两个数据窗长度进行求和运算,并规定横坐标轴以上波形的积分模值为正,横坐标轴以下波形的积分模值为负,最后将方向特征值代入式(13)进行判别。

表1为 F_1 点发生不同类型故障时M端保护的计算结果(本文所有结果均以过渡电阻为 $300\ \Omega$ 进行的计算,其他值亦可)。由表1可知, F_1 点故障时,只要 ε_1 取0.03,即可满足判别式(13)的要求,考虑保护动作的可靠性, ε_1 取0.05,从而可正确判断系统外部发生故障。

F_1 点故障时, ε_1 值可取0.05,但当系统外部不同地点发生故障时, ε_1 取0.05未必会满足式(13),下面对系统外部不同地点发生AB相间故障为例进行仿真,其计算结果如表2、表3所示。由表2、表3可知,系统外部不同地点发生故障时, ε_1 取0.05能使式(13)恒成立,所以 ε_1 可取0.05。

4.4 区内故障

当M端正方向 F_2 点发生故障(如AB相间故障)时,分别得到如图5所示方向电流行波。

表1 F_1 点发生不同类型故障时的仿真情况Tab. 1 Simulation of different types of faults at F_1

短路类型	I_{M20}^+ (A·μs)	I_{N20}^- (A·μs)	$1 - (I_{N20}^- / I_{M20}^+)$	ε_1
AG	39 903.2	39 269.4	0.015 9	
BG	9 152.0	8 989.9	0.0177	
CG	10 749.1	10 593.3	0.014 5	
ABG	71 585.4	70 418.4	0.016 3	
BCG	14 720.3	14 485.7	0.015 9	0.03
CAG	74 700.3	73 545.8	0.015 5	
AB	19 692.7	19 368.6	0.016 5	
CA	20 772.9	20 453.1	0.015 4	
ABC	26 985.7	26 556.7	0.015 9	

表2 M端反方向不同地点发生故障时的仿真情况

Tab. 2 Simulation of fault in different locations on the negative direction of M

F_1 点与M端的距离/km	I_{M20}^+ (A·μs)	I_{N20}^- (A·μs)	$1 - (I_{N20}^- / I_{M20}^+)$	ε_1
30	19 798.4	19 544.9	0.012 8	
80	19 803.5	19 547.5	0.012 9	0.02
120	19 737.3	19 413.0	0.016 4	

表3 M端正方向不同地点发生故障时的仿真情况

Tab. 3 Simulation of fault in different locations on the positive direction of M

F_2 点与N端的距离/km	I_{M20}^+ (A·μs)	I_{N20}^- (A·μs)	$1 - (I_{N20}^- / I_{M20}^+)$	ε_1
30	13 037.5	13 213.6	0.013 5	
80	12 564.3	12 736.9	0.013 7	0.02
120	12 168.7	12 380.7	0.017 4	

由图5可知,当 F_2 点发生故障时,正、反向电流行波同时到达M和N端。记录线路两端行波波头的到达时间,经理论计算可知, F_2 点发生故障后,正、反向电流行波经过 $680.27\ \mu\text{s}$ 到达M端,经过 $1\,496.60\ \mu\text{s}$ 到达N端。

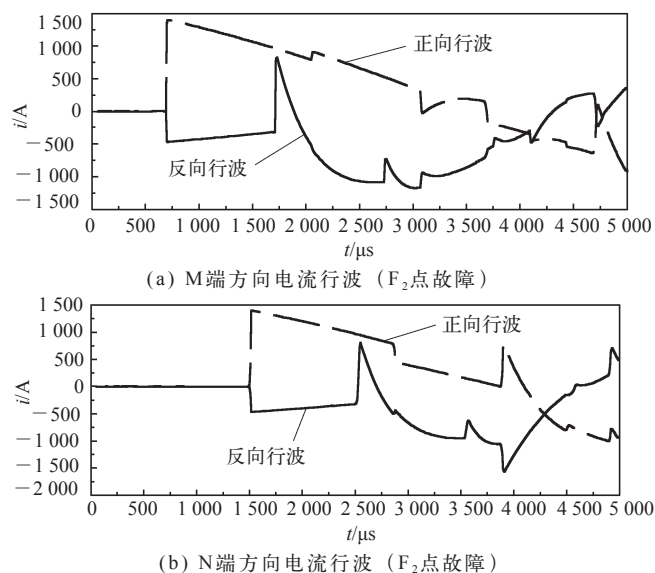


图5 内部故障时M、N两端的方向电流行波

Fig. 5 Waves at both terminals when internal fault occurs of line MN

计算M端反向电流行波波头20 μs宽波形的积分模值（反向特征值）和N端正向电流行波波头20 μs宽波形的积分模值，将其代入式（16）进行判别。

表4为F₂点发生不同类型故障时的计算结果，表5为系统内部不同地点发生AB相间故障时的计算结果。由表4、表5可知，F₂点故障时，只要ε₂取1.2，即可满足判别式（16），考虑保护动作的可靠性，ε₂取1.0。

表4 F₂点发生不同类型故障时的仿真情况Tab. 4 Simulation of different types of faults at F₂

短路类型	$I_{M20}^+ / (A \cdot \mu s)$	$I_{N20}^- / (A \cdot \mu s)$	$1 - (I_{N20}^- / I_{M20}^+)$	ε_2
AG	61 836.5	-20 549.2	1.332 3	1.3
BG	10 343.8	-3 485.4	1.337 0	
CG	20 593.3	-6 848.6	1.332 5	
ABG	103 518.3	-34 413.1	1.332 4	
BCG	22 826.2	-7 607.8	1.333 3	
CAG	123 571.5	-40 993.1	1.331 7	
AB	28 000.5	-9 337.0	1.333 5	
CA	34 953.0	-11 618.2	1.332 4	
ABC	41 960.8	-13 955.6	1.332 6	

表5 M、N两端正方向不同地点发生故障时的仿真情况

Tab. 5 Simulation of fault in different locations on the positive direction of M and N

F ₂ 点与M端的距离/km	$I_{M20}^+ / (A \cdot \mu s)$	$I_{N20}^- / (A \cdot \mu s)$	$1 - (I_{N20}^- / I_{M20}^+)$	ε_2
0	32 924.0	-7 142.0	1.216 9	1.2
50	61 517.7	-20 350.3	1.330 8	
100	29 020.5	-9 579.0	1.330 1	
200	28 000.5	-9 337.0	1.333 5	
320	26 360.9	-8 777.6	1.333 0	
500	23 096.1	-7 766.0	1.336 2	
640	14 568.3	-7 504.0	1.515 1	

根据ε₁、ε₂的取值及系统对可靠性要求，选取保护动作阈值δ，当ε小于δ时，系统外部发生故障，否则系统内部发生故障，使保护可靠动作。

5 结束语

针对带高压并联电抗器的交流特高压输电线路，本文提出了一种以方向电流行波波头的积分作为特征值构成的新的行波差动保护方法。该方法充分利用了故障初期行波波头信息，能够正确反映系统内外部短路故障。由于高压并联电抗器的存在，系统正常运行、区外故障时有较大的暂态不平衡差流，采用该方法，可以有效地躲过暂态不平衡差流，而且本文采用两个门槛值以获取保护动作阈值，保护动作更加可靠。采集到行波后，方向电流行波波头的积分计算时间很短，只须将信息传送到对端的线路传输时间和本端的计算判别时间，不必等行波的来回折反射，且方法简单，因而保护动作速度较传统行波差动保护更快。该方法对采样频率、通信系统及计算机技术没有过高的要求，能够在现有的技术条件下实现，具有较

高的实用价值。

参考文献

- [1] 曾庆禹. 1 000 kV特高压输电系统输电能力研究[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 1-6.
- [2] 董新洲, 苏斌, 薄志谦, 等. 特高压输电线路继电保护特殊问题研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 19-22.
- [3] 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, 35(20): 1-6, 12.
- [4] 陈福锋, 钱国明, 宋国兵. 串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 89-94.
- [5] ZHANG Yanxia, XUAN Wenbo, ZHANG Hongyuan. A new principle of traveling wave differential protection on series-capacitor-compensated transmission lines[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(4): 754-764.
- [6] 张丽, 徐玉琴. 并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 75-78.
- [7] 王全, 徐习东. 基于行波差动原理的线路保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 86-89, 95.
- [8] 张武军, 何奔腾, 沈冰. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 56-61.
- [9] 袁兆强, 张承学. 超(特)高压输电线路高速行波差动保护[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 13-17.
- [10] 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.
- [11] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 25-29, 35.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 41-44, 70.
- [13] HE Baina, ZHAO Yunwei, HA Hengxu. A novel traveling wave based differential protection for distributed parameter line[J]. Telkomnika - Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(9): 5097-5104.
- [14] 桑丙玉, 王晓茹. 特高压长线路电流差动保护自适应电容电流补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 1-5.
- [15] 王利平, 王晓茹, 王伟, 等. 输电线路故障测距实用算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 52-58.
- [16] 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[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 50-55.
- [17] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.
- [18] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-12.
- [19] 和敬涵, 范瑜, 薄志谦, 等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 116-120, 136.
- [20] 和敬涵, 张飏, 范瑜, 等. 解耦变换在电力系统暂态保护中的应用研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(5): 101-104.

作者简介



刘新军

刘新军(1971-)男,工程师,主要从事电气设计方面的工作。

(收稿日期:2019-08-15)EA