

基于贝瑞隆模型的特高压线路单端暂态电流保护

焦彦军, 于江涛, 王增平

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Single-ended Transient Current Protection Based on Bergeron Model for the UHV Transmission Lines

JIAO Yan-jun, YU Jiang-tao, WANG Zeng-ping

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Based on the Bergeron model, a new principle on single-ended transient current protection is presented. In the propagation of the fault current traveling wave along the ultra high voltage (UHV) line, the spread direction of initial fault traveling wave depends on fault direction, the first interval of traveling wave breaks detected at the measurement point is related to the fault distance, the phase fault current is zero in non-fault phase and is half of the fault branch current at the fault point before the arrival of the wave reflected by bus. According to the above-mentioned features, a protection scheme is put forward by deducing the single-ended electrical quantities to a specific point and comparing the pre-deduced and post-deduced transient currents. The proposed principle is independent of network construction, load current, fault type and transition resistance. The simulation results in ATP and Matlab confirm the principle is rapid, sensitive and reliable.

KEY WORDS: Bergeron model; ultra high voltage (UHV) line; single-ended; transient current protection; transition resistance; deduced current

摘要: 提出了一种基于贝瑞隆模型的暂态电流保护新原理。特高压(ultra high voltage, UHV)输电线路的故障电流行波传播过程中, 故障初始行波方向与故障方向有关, 测量点处第1个行波突变时间间隔与故障距离有关, 故障点处在故障行波的母线反射波返回前非故障相中相故障电流为0且故障相的故障电流为故障支路电流的1/2。根据上述特点, 利用贝瑞隆模型将单端电气量归算到特定位置并对比归算前后的暂态电流来构成保护, 该原理不受网络结构、负荷电流、过渡电阻及故障类型的影响。ATP及Matlab仿真结果证明该方法快速、灵敏、可靠。

关键词: 贝瑞隆模型; 特高压线路; 单端; 暂态电流保护; 过渡电阻; 归算电流

0 引言

特高压线路中存在系统时间常数大、线路电容大的特点, 对基于工频量原理的保护产生了一定的影响, 而利用故障暂态量及行波理论来构成保护能有效地提高保护动作速度, 但特高压线路中故障暂态分量的行波分布特征依赖于故障的类型、故障发生位置及网络结构, 增大了暂态量原理在保护中的应用难度。

基于暂态量原理的保护主要分为基于单端量和基于双端量2种, 文献[1-3]分别对单端和双端暂态量原理的应用进行了介绍和分析。基于单端暂态量原理的保护通过故障暂态量特征与故障距离的相互关系来进行故障范围判断, 但其原理仍存在一定的缺陷, 应用较困难。文献[4]分析了单相接地故障下故障点处故障行波的产生及折反射过程; 文献[5-9]对单端行波测距原理进行了研究和改进, 在一定范围内解决了单端行波测距无法识别第2个行波的性质而造成测距不准的问题; 文献[10-17]研究了故障位置、网络结构及其元件对行波中各频率成分的幅频影响, 提出了相应的暂态量保护原理。单端暂态量保护测距精度高, 不需要复杂的通信和同步装置, 具有较强的应用和研究价值。

本文根据行波在线路上的特点, 提出利用贝瑞隆模型对单端电气量进行归算, 通过比较归算前后的模电流突变时间判别故障发生方向; 利用测量点处模电流突变的时间差来确定故障位置; 接地故障时选择合适的归算距离, 减小非故障相中的电流及行波, 使保护能在任意故障下按相判断故障; 发生经过渡电阻短路时, 用故障点的暂态电气量与过渡

电阻的关系校验故障位置。本方法无需考虑网络的传输系数和折反射系数，其性能不受网络结构及负荷电流的影响，抗过渡电阻能力强。ATP 及 Matlab 仿真结果表明该方法快速、灵敏、可靠。

1 贝瑞隆模型简介

特高压输电线路一般采用具有分布参数的均匀无损传输线模型来描述^[18]。均匀无损传输线的传播系数 γ 、波速 v 及波阻抗 Z_c 与频率无关，对不同频率的信号可用相同的波动方程对暂态过程进行描述，而均匀无损传输线的上述 3 个参数均与频率有关，无法得到全频率下的波动方程。贝瑞隆模型是在满足工程需要的条件下对均匀无损传输线的一种近似，使用的方法是将一段均匀无损传输线分成 2 段，每段将线路电阻分别集中到线路两侧，如图 1 所示。

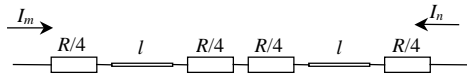


图 1 贝瑞隆线路模型

Fig. 1 Bergeron model of the transmission line

若长度为 L 的均匀无损传输线的单位长度线路电阻为 R_0 ，线路电感为 L_0 ，线路对地电容为 C_0 ，则图 1 中线路 l 是长度为 $L/2$ 的均匀无损传输线，其单位长度线路电感为 L_0 、线路对地电容为 C_0 、特征阻抗 $Z_c = \sqrt{L_0 / C_0}$ 。图 1 中电阻 R 为 R_0L 。贝瑞隆模型线路两端电流电压的关系为

$$\begin{bmatrix} u_m(t) \\ i_m(t) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_n(t) \\ i_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n(t) \\ i_n(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，

$$A = -D = D_c(\tau)[1/2 + R^2/(32Z_c^2) + R/(4Z_c)] + D_c(-\tau)[1/2 + R^2/(32Z_c^2) - R/(4Z_c)] - R^2/(16Z_c^2) \quad (2)$$

$$B = -D_c(\tau)[3R/8 + R^3/(128Z_c^2) + Z_c/2 + 3R^2/(32Z_c)] - D_c(-\tau)[3R/8 + R^3/(128Z_c^2) - Z_c/2 - 3R^2/(32Z_c)] - R/4 + R^3/(64Z_c^2) \quad (3)$$

$$C = D_c(\tau)[R/(8Z_c^2) + 1/(2Z_c)] + D_c(-\tau)[R/(8Z_c^2) - 1/(2Z_c)] - R/(4Z_c^2) \quad (4)$$

式中： $\tau = L\sqrt{L_0C_0}$ ； $D_c(\tau)$ 定义为延迟因子； $f(t + \tau)$ 可以用 $f(t)D_c(\tau)$ 表示。

通过贝瑞隆模型可得到均匀无损传输线的近似波动方程，从而快速方便地对电流电压进行近似归算，减小电容电流的影响，减小传输产生的幅值及相位的变化。贝瑞隆模型的计算公式是基于图 1 模型，计算结果与线路实际情况相比存在一定的误

差，但图 1 中各元件仅产生输入所含频率的响应，所以该模型在不同频率下的误差仅影响该频率响应的幅值与相角，而不影响该频率响应的有无，归算后各频率成分近似保持归算前的变化规律。与无畸变模型相比，贝瑞隆模型基波频率下较精确，可通过增加分段数量来提高计算准确度。

2 故障电流行波在线路上的特点

线路发生故障时，故障点向两侧发出行波，行波在线路上传播并不断衰减的过程中存在如下特点：

1) 首次经过测量点的故障电流行波传输方向与故障方向有关。

系统测量点一般距离母线等可反射行波的设备极近。发生正向故障时，测量点首次检测到的电流行波一般由故障入射波与母线反射波组成，且入射波与反射波到达时间基本相同；发生反向故障时，测量点首次检测到的行波仅包含故障入射波。若上述入射波和反射波均通过线路正向与测量点具有一定距离的某一点，入射波与反射波到达该点的时间将不相同，该点处电流行波首次到达时间与故障方向、故障距离有直接的关系，通过对比该点与测量点的电流突变时间可确定故障的方向。

2) 故障电流行波连续 2 次经过测量点的时间差与故障折射系数、故障位置及行波波速有关。

故障时的各模故障行波连续 2 次到达测量点的时间差由该模行波的波速与测量点到反射点的距离决定。故障点无行波折射或故障发生在线路前半段时，该时间差为行波从故障点传播到测量点所需时间的 2 倍；故障发生在线路后半段且故障点存在较大折射时，该时间差为行波从故障点传播到对侧母线所需时间的 2 倍。如能确定或校验线路发生故障的范围，通过该时间差及波速就能计算出故障距离。

3) 相间故障可按相检测故障电流。

发生相间故障时，两故障相的故障电流大小相等、方向相反。三相参数完全对称时，两故障相故障电流在非故障相处的耦合电流相互抵消，在非故障相不产生故障电流行波；三相参数不完全对称时，非故障相内耦合产生的故障电流远小于故障相^[14]，两故障相故障电流及行波相差不大，大小近似相等、方向相反，对按相检测故障电流影响不大。

4) 发生接地故障后一段时间内，故障点非故障相中无故障电流。

发生接地故障时，从故障发生到反射波返回故

障点之前,故障点处的故障行波完全由故障产生,在该时段内非故障相在故障点没有电流的波动,可认为非故障相在故障点的各模行波相互抵消。若对故障点处电流按相进行检测,非故障相将检测不到故障电流,而故障相将检测出较大的故障电流,对于接地故障可在故障点按相进行检测。

5) 发生经过渡电阻短路时,故障点处的故障电流、电压与过渡电阻具有一定的关系。

经过渡电阻短路时,故障点有一定的折射系数,对侧母线反射波可折射到本侧,对故障测距产生影响。通过过渡电阻的故障电流大小由故障点处的电压及过渡电阻决定,故障点两侧线路上的故障附加电流之和始终等于过渡电阻上的故障电流。

设系统发生非接地故障时故障点相电压为 $u_\phi(t)$, 无故障时为 $u'_\phi(t)$ 。故障附加电压 $\Delta u_\phi(t) = u_\phi(t) - u'_\phi(t)$, 故障点两侧的附加电流分别为 $\Delta i_{1\phi}(t)$ 与 $\Delta i_{2\phi}(t)$, 其和等于故障电流 $\Delta i_\phi(t)$ 。其中 ϕ 为相别, 1ϕ 为 ϕ 相本侧, 2ϕ 为 ϕ 相对侧。

相间短路与三相短路均可表示成三相相间分别经过渡电阻短路,若故障时 $\phi_1\phi_2$ 相间过渡电阻为 $R_{\phi_1\phi_2}$, 则故障点处 $\phi_1\phi_2$ 的相间故障电流满足

$$u_{\phi_1}(t) - u_{\phi_2}(t) = \Delta i_{\phi_2\phi_1}(t) R_{\phi_1\phi_2} = -\Delta i_{\phi_1\phi_2}(t) R_{\phi_1\phi_2} \quad (5)$$

相间故障电流与相故障电流关系为

$$\Delta i_{\phi_1}(t) = \Delta i_{\phi_1\phi_2}(t) + \Delta i_{\phi_1\phi_3}(t) \quad (6)$$

故障点两侧在故障开始到反射波返回之前均无反向行波,以 θ 表示不同模,则有

$$\Delta u_\theta(t) - Z_{c\theta} \Delta i_{1\theta}(t) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta u_\theta(t) - Z_{c\theta} \Delta i_{2\theta}(t) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta i_\theta(t) = 2\Delta i_{1\theta}(t) = 2\Delta i_{2\theta}(t) = 2\Delta u_\theta(t) / Z_{c\theta} \quad (9)$$

由于本侧电流已知,从故障开始到对侧母线反射波到达故障点之前,有

$$\Delta i_\theta(t) = \Delta i_{1\theta}(t) + \Delta u_\theta(t) / Z_{c\theta} \quad (10)$$

根据故障时特定点处本侧的电流电压,结合式(5)~(10)可计算该点的模电流,并可计算出等效过渡电阻。若该点为故障点,则电阻的计算结果稳定。

3 基于贝瑞隆模型的单端暂态电流保护

3.1 正反向故障的识别

图2中, A 为线路的 n 母线侧测量点, B 为线路中某一点,行波在线路 AB 上的传播时间为 τ , 故障点 F_1 位于 A 点与 n 母线间, F_2 位于线路末端, F_3 位于 A 点正向近距离。 A 点首次检测到电流突变时刻为 t_0 , 以 $F(A)$ 表示行波首次达到 A 点的时刻。

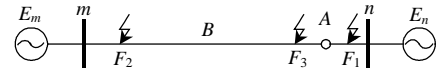


图2 故障位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fault positions

F_1 发生故障,首次经过 A 点的行波方向由右向左,该行波在 $t_0 + \tau$ 时刻经过 B 点,式(11)成立。

$$F(B) - F(A) = \tau > 0 \quad (11)$$

F_2 发生故障,首次经过 A 点的行波由故障入射波和母线反射波组成,分别在 $t_0 - \tau$ 及 $t_0 + \tau$ 时经过 B 点,式(12)成立。

$$F(B) - F(A) = -\tau < 0 \quad (12)$$

F_3 发生故障,首次经过 A 点的行波也由故障入射波和母线反射波组成,假设入射波与反射波均经过 B 点,两行波将在 $t_0 - \tau$ 及 $t_0 + \tau$ 分别经过 B 点。与 F_2 故障相比,各行波经过 B 点的时刻是虚拟的,在数值上与 F_2 发生故障相同,故障点的反射波虚拟经过 B 点的时间要晚于故障入射波,式(12)成立。

利用贝瑞隆模型可将 A 点的电流电压归算到 B 点,比较 A 、 B 的电流突变时间就可区别故障方向,反向故障时式(11)成立,正向故障时式(12)成立。

3.2 故障位置的测量

长为 L 的线路在正向 x km 处发生故障,若波速为 v_1 与 v_2 的两行波到达测量点的时间差为 Δt_1 , 则距离 l_1 的计算式为

$$l_1 = \Delta t_1 v_1 v_2 / (v_1 - v_2) = x \quad (13)$$

若波速为 v_3 的行波连续 2 次到达测量点的时间差为 Δt_2 , 则距离 l_2 的计算式为

$$l_2 = v_3 \Delta t_2 / 2 \quad (14)$$

用式(14)计算距离,若故障点无折射或 $x \leq L/2$, 则

$$x = l_2 \quad (15)$$

若故障点存在折射且 $x > L/2$, 则

$$x = L - l_2 \quad (16)$$

系统发生接地故障时存在不同波速的行波,可用式(13)计算故障距离 x , 用式(14)~(16)辅助判断。

用式(14)计算故障位置有可能发生错误,同时选择 $L - l_2$ 及 l_2 为故障距离,在确定故障相后分别检验两处的电流电压,选择出正确的故障距离。

3.3 故障类型识别及选相

系统发生故障时,可通过判断是否有零模电流或行波快速区分接地与非接地故障,接地故障需对可能的故障行波首波头分离并进行补偿。

1) 非接地故障的选相。

故障行波在从故障点传输到测量点的过程中,

行波将发生衰减，通过贝瑞隆模型进行归算可对衰减进行补偿。采用小波模极大值对电流突变进行检测时，归算前后故障相检测值差别较大，非故障相在归算前后检测值差别不大。选择合适的归算距离，在大多数情况下非故障相的电流突变检测值满足

$$|W_f(B, t_0 - \tau_1, k_2)| \approx |W_f(A, t_0, k_2)| < K \quad (17)$$

故障相的电流突变检测值满足

$$|W_f(B, t_0 - \tau_1, k_1)| > K \quad (18)$$

$$|W_f(B, t_0 - \tau_1, k_1)| > |W_f(A, t_0, k_1)| \quad (19)$$

式中： k_1 表示故障相； k_2 表示非故障相； K 为门限值； τ_1 为行波从测量点传输到归算点所需的时间； $W_f(A, t_0, k_1) = C$ 表示 A 点 t_0 时刻 k_1 相电流突变检测值为 C 。

2) 接地故障的选相。

接地故障时同时产生零模和线模故障行波，故障行波的首波头在经过一定距离的传输后发生分离，因此无法单纯按相检测电流突变来确定故障相。由于接地故障发生后的一段时间内非故障相在故障点处电流无变化，则可通过贝瑞隆模型将电流及电压归算到故障点附近后再按相检测电流突变。

接地故障的故障位置较远时，故障行波的首波头分离严重，归算距离由故障测距决定，归算效果较好；故障位置极近时，故障行波的首波头分离不明显，故障入射波与母线反射波重叠，选择归算距离略小于测距精度，确保非故障相故障入射波与折射后母线反射波分离且非故障相各模故障电流相互抵消，由于归算距离近，可能对非故障相按相检测电流突变造成一定影响。归算前后故障相的电流突变检测满足式(18)和(19)，非故障相的电流突变检测满足

$$|W_f(B, t_0 - \tau_1, k_2)| < |W_f(A, t_0, k_2)| \quad (20)$$

3.4 故障位置校验

故障位置校验指对可能的故障距离 $L-l_2$ 及 l_2 进行校验与选择，在 $L-l_2$ 或 l_2 近似为 L 时仅对线路出口进行校验。基本原理是计算故障点两侧的故障附加电流之和 $\Delta i_\phi(t)$ 及短路瞬间的等效过渡电阻 $R_{\phi 1 \phi 2}$ ，计算 $R_{\phi 1 \phi 2}$ 条件下的故障电流 $\Delta i'_\phi(t)$ ，提取满足

$$\Delta i'_\phi(t) - \Delta i_\phi(t) \approx 0 \quad (21)$$

的时间段。若校验位置为故障点，计算过渡电阻与实际电阻相差不大， $\Delta i'_\phi(t)$ 的计算结果与实际情况大致相等，在一段时间内式(21)成立，时间段长度与 $\Delta i_\phi(t)$ 的计算方法有关；若校验位置不为故障点

时，仅 t_k 时刻满足式(21)。

若装置采样时间间隔为 Δt ，角频率为 ω ，校验位置电流首次突变时刻为 t_k ，理论上本侧母线反射波到达校验位置时刻为 t_1 ，对侧母线反射波到达校验位置时刻为 t_2 。可用式(1)计算该点短路前后一段时间内 $u_\phi(t)$ 及 $i_\phi(t)$ ，构造的无故障电压 $u'_\phi(t)$ 为

$$\begin{cases} u'_\phi(t) = u_\phi(t), & t < t_k \\ u'_\phi(t) = 2u'_\phi(t - \Delta t) \cos(\omega \Delta t) - u'_\phi(t - 2\Delta t), & t \geq t_k \end{cases} \quad (22)$$

计算的故障附加相电压 $\Delta u_\phi(t)$ 为

$$\Delta u_\phi(t) = u_\phi(t) - u'_\phi(t) \quad (23)$$

可按式(9)计算故障点两侧故障附加电流之和 $\Delta i_\phi(t)$ ，式(9)对两侧母线反射波均未考虑，校验点为故障点时的校验结果中满足式(21)的时间段应为 $[t_k, \min(t_1, t_2)]$ ，也可构造本侧无故障电流 $i'_\phi(t)$ 及故障附加电流 $\Delta i_\phi(t)$ ：

$$\begin{cases} i'_\phi(t) = i_\phi(t), & t < t_k \\ i'_\phi(t) = 2i'_\phi(t - \Delta t) \cos(\omega \Delta t) - i'_\phi(t - 2\Delta t), & t \geq t_k \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta i_\phi(t) = i_\phi(t) - i'_\phi(t) \quad (25)$$

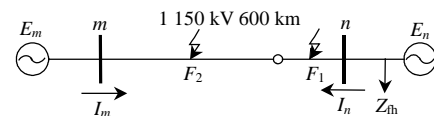
按式(10)计算 $\Delta i_\phi(t)$ ，式(10)未考虑对侧母线反射波，校验点为故障点时的校验结果中满足式(21)的时间段应为 $[t_k, t_2)$ 。本文仿真中选择后者进行计算。

可按式(5)、(6)用 t_k 、 $t_k + \Delta t$ 时刻 $\Delta i_\phi(t)$ 的值计算三相过渡电阻 $R_{\phi 1 \phi 2}$ (相间故障时仅需计算两故障相的相间过渡电阻)。用式(5)、(6)计算过渡电阻为 $R_{\phi 1 \phi 2}$ 时的 $\Delta i_\phi(t)$ ，记为 $\Delta i'_\phi(t)$ ，并提取满足式(21)的时间段。

以上为非接地故障的校验，接地故障应将零模线模电流电压分开计算，校验方法与非接地故障的校验大致相同。

4 仿真实验

利用 ATP 的仿真功能及 Matlab 的计算功能进行仿真计算。仿真采用如图 3 所示的长为 600 km 的 1 150 kV 双端电源系统，忽略线路对地电导， n 侧电源相角超前 m 侧 70° ， n 侧所带负荷等效成大



$$E_m = 1.027 U_n; E_n = 1.087 U_n; Z_m = 0.1 Z_L; Z_n = 0.5 Z_L;$$

$$R_1 = 0.0049 \Omega/\text{km}; L_1 = 0.930372 \text{ mH}/\text{km}; C_1 = 0.01764 \mu\text{F}/\text{km};$$

$$R_0 = 0.2752 \Omega/\text{km}; L_0 = 2.977197 \text{ mH}/\text{km}; C_0 = 0.0159 \mu\text{F}/\text{km}.$$

图 3 1 150 kV 系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of 1 150 kV transmission system

小为 $225.045\ 2 + j32.067\ 2\ \Omega$ 的阻抗 Z_{fh} 。系统故障发生时刻为 $0.1\ s$ ，每周波基准采样 200 点，贝瑞隆模型计算所需的数据采用直接采样方式。 A 为采样点； F_1 为距离 A 反向 $0\ km$ ； F_2 为距离 A 正向 l 处。仿真时未考虑互感器传变特性的影响。

计算过程中使用凯伦鲍尔变换进行电流和电压的相模变换；使用小波变换模极大值法进行电流突变检测，使用的小波函数为具有线性相位的 `bior4.4`。

1) 正反向故障的识别。

正反向故障的判断通过对线模电流的突变进行检测来实现， F_1 与 $F_2(l=0\ km)$ A 相经 $1\ k\Omega$ 接地时线模电流的小波变换模极大值波形如图 4 所示，归算距离为 $197\ km$ (线模行波传输时间约为 $0.8\ ms$)。

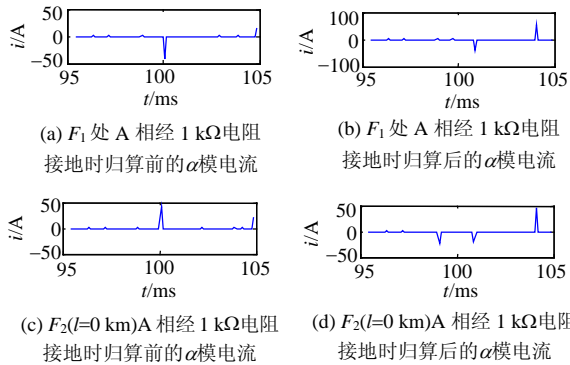


图 4 α 模电流模极大值
Fig. 4 Modulus maxima of α mode current

经大量实验验证，若测量点 A 处线模电流突变检测有 $F(A)=t_0$ 成立时，归算到线路上任一点 B 后，若线模行波从 A 点传输到 B 点的时间为 τ ，正向故障时满足式(11)，反向故障时满足式(12)，波形与图 4 类似，与本文 3.1 节所得结论相同。

2) 故障类型识别及选相。

故障类型识别及选相使用的故障条件及其仿真计算结果如表 1 所示，表 1 中故障 13 归算前后的相电流模极大值波形如图 5 所示。接地故障时行波首波头分离不影响归算距离的计算，归算后的相电流可满足故障选相的要求。

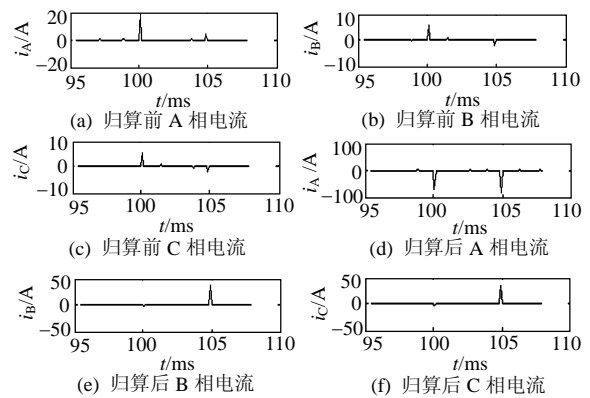


图 5 F_2 点 ($l=0\ km$) 发生 A 相经 $1\ k\Omega$ 电阻接地时相电流模极大值
Fig. 5 Modulus maxima of phase current when A-ground fault occurs

表 1 故障类型识别及选相计算结果

Tab. 1 Calculation results of fault type recognition and fault phase selection

序号	故障类型	过渡电阻/ $k\Omega$	故障距离/ km	故障测距/ km	归算距离/ km	电流首次突变时刻/ ms	归算前检测值的绝对值/ A			归算后电流首次突变时刻/ ms	归算后检测值的绝对值/ A		
							A 相	B 相	C 相		A 相	B 相	C 相
1	三相短路	0	0	0	197	100.0	46.67	3.192	49.860	99.3	409.8	30.32	440.2
2	三相短路	0	100	99	197	100.5	149.1	12.370	136.700	99.7	845.6	35.99	809.6
3	三相短路	0	300	296	197	101.3	116.5	32.410	84.120	100.5	959.3	220.30	739.0
4	BC 相间	0	0	0	197	100.1	0.020 3	30.210	30.230	99.3	0.021 2	235.20	235.30
5	BC 相间	0	100	99	197	100.5	0.000 2	62.170	62.170	99.7	0.258 0	386.70	386.90
6	BC 相间	0	300	296	197	101.3	0.233 2	25.970	25.740	100.5	0.000 4	259.30	259.30
7	BC 相间	0.5	0	0	197	100.1	0.020 3	17.600	17.620	99.3	0.021 3	110.00	110.00
8	BC 相间	0.5	100	99	197	100.5	0.000 2	19.570	19.580	99.7	0.258 0	121.40	121.70
9	BC 相间	0.5	300	296	197	101.3	0.233 2	8.279	8.046	100.5	0.000 4	81.66	81.66
10	A 相接地	0	0	0	8	100.1	58.030	19.840	19.860	100.0	277.500	8.297 0	8.326 0
11	A 相接地	0	100	99	99	100.4	65.690	9.892	9.893	100.1	647.200	0.041 8	0.071 8
12	A 相接地	0	300	296	296	101.3	59.420	29.680	29.740	100.1	729.000	6.733 0	6.699 0
13	A 相接地	1	0	0	8	100.1	18.330	5.364	5.392	100.1	64.930	3.830 0	3.802 0
14	A 相接地	1	100	99	99	100.4	8.562	1.289	1.290	100.1	84.370	0.000 0	0.015 1
15	A 相接地	1	300	296	296	101.3	7.544	3.741	3.802	100.1	95.030	0.896 6	0.862 3

经大量实验验证，非接地故障的故障类型识别及选相计算结果满足式(17)~(19)，接地故障的计算结果满足式(18)~(20)，与本文 3.3 节所得结论相同。

3) 非接地故障的故障位置校验。

线路正向 BC 相间经 $500\ \Omega$ 短路，故障距离为

$200、400\ km$ 时的 B 相电流校验结果如图 6 所示。故障距离为 $200\ km$ 时的计算过渡电阻为 $499.79\ \Omega$ ($200\ km$ 校验)及 $1\ 656.2\ \Omega$ ($400\ km$ 校验)；故障距离为 $400\ km$ 时的计算过渡电阻为 $662.7\ \Omega$ ($200\ km$ 校验)及 $499.82\ \Omega$ ($400\ km$ 校验)。校验点为故障点时，计

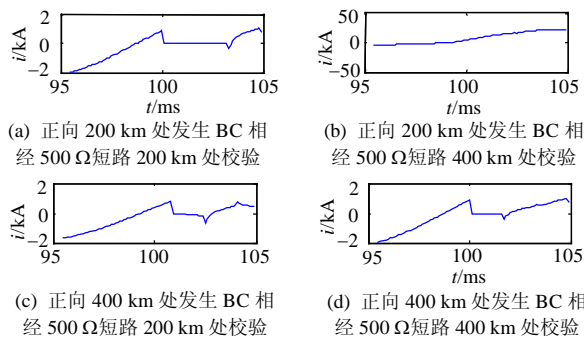


图 6 故障位置校验结果

Fig. 6 Results of fault position verification

算过渡电阻与实际过渡电阻相差不大；校验点不为故障点时，计算电阻与实际过渡电阻相差较大。设归算后电流首次发生突变时刻为 t_k ，则根据归算距离及波速可计算对侧反射波返回时刻 t_2 ，确定时间段 $[t_k, t_2]$ 。图 6 故障点处的校验结果中，时间段 $[t_k, t_2]$ 内式(21)近似成立，最大偏差小于 3 A；非故障点的校验结果中，时间段 $[t_k, t_2]$ 内式(21)的最大偏差大于 500 A，且 t_k 后某时刻偏差会发生突变，从 t_k 开始到偏差发生突变的时间段长度与该故障归算到故障点时的校验时间段长度相等。

经大量实验验证，故障点的校验结果与本文 3.4 节所得的结论相同。

5 结论

1) 基于贝瑞隆模型的单端暂态电流保护充分利用了行波在线路上的传输特征，不受网络结构、负荷电流、电容电流、故障类型及过渡电阻的影响。

2) 该保护对故障行波引起的基波幅值及相角的变化反应灵敏，抗过渡电阻的能力较强。

3) 与传统单端行波故障测距相比，该保护增加了故障位置的校验过程，提高了故障测距的准确性，提高了保护的适应能力及可靠性。正向区外对侧母线外侧发生故障时，若故障点与对侧母线有一定距离，保护不误动；若故障点距离对侧母线极近，该保护将误判为线路末端故障。

4) 故障发生在线路中点附近时，两校验点的校验结果接近，但不影响保护动作，可根据校验结果中式(21)的偏差突变时间进行辅助判断。

5) 该保护受行波保护原理限制。若对地电压为 0 时发生单相接地或相间电压为 0 时发生相间短路，保护装置可能无法启动而造成保护拒动。

参考文献

[1] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行

波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.

- Qin Jian, Ge Weichun, Qiu Jinhui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95(in Chinese).
- [2] 苏斌, 董新洲, 孙元章, 等. 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.
- Su Bin, Dong Xinzhou, Sun Yuanzhang, et al. Traveling wave differential protection based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 25-29, 35(in Chinese).
- [3] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲, 等. 基于小波变换的行波测距距离保护原理的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 9-13.
- Dong Xingli, Ge Yaozhong, Dong Xinzhou, et al. Wavelet transform based distance protection scheme with traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 9-13(in Chinese).
- [4] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32, 53.
- Shi Shenxing, Dong Xinzhou, Zhou Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32, 53(in Chinese).
- [5] 卢继平, 黎颖, 李健, 等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 65-69.
- Lu Jiping, Li Ying, Li Jian, et al. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69(in Chinese).
- [6] 徐青山, 陈锦根, 唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.
- Xu Qingshan, Chen Jinggen, Tang Guoqing. Single ended fault location approach considering bus distributed capacitance effect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 70-73(in Chinese).
- [7] 徐青山, Lai L L, 陈锦根, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 21-25.
- Xu Qingshan, Lai L L, Chen Jinggen, et al. Novel and comprehensive countermeasures for single terminal fault location of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 21-25(in English).
- [8] 黄子俊, 陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.
- Huang Zijun, Chen Yunping. Non-communication fault locating of transmission line based on wavelet modulus maxima[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-14(in Chinese).
- [9] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.
- Jiang Tao, Lu Yuping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 29-32(in Chinese).
- [10] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理的研究(一)故障暂态过程分析及实现单端量暂态保护的可行性[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(6): 1-5.

- Zhang Baohui, Ha Hengxu, Lü Zhilai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line, part 1: fault transient analysis and the feasibility of non-unit transient protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 1-5(in Chinese).
- [11] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理的研究(二)保护判据的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 1-6.
- Zhang Baohui, Ha Hengxu, Lü Zhilai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line, part 2: protection criteria[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 1-6(in Chinese).
- [12] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43.
- Duan Jiandong, Zhang Baohui, Ren Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43(in Chinese).
- [13] 段建东, 张保会, 李鹏, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的实用算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 45-51.
- Duan Jiandong, Zhang Baohui, Li Peng, et al. Principle and algorithm of non-unit transient-based protection for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 45-51(in Chinese).
- [14] 段建东, 张保会, 周艺, 等. 基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 1-6.
- Duan Jiandong, Zhang Baohui, Zhou Yi, et al. Transient-based faulty phase selection in EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 1-6(in Chinese).
- [15] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 69-74.
- Wu Linyong, He Zhengyou, Qian Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-74(in Chinese).
- [16] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 99-104.
- Wu Linyong, He Zhengyou, Qian Qingquan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 99-104(in Chinese).
- [17] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 高压输电线路单端测距新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 42-45, 49.
- Ha Hengxu, Zhang Baohui, Lü Zhilai. A novel principle of singleended line fault location technique for EHV transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 42-45, 49(in Chinese).
- [18] 贺家李, 葛耀中. 超高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 36-42, 77.
- He Jiali, Ge Yaozhong. Fault analysis and relay protection of EHV transmission lines[M]. Beijing: Science Press, 1987: 36-42, 77(in Chinese).



焦彦军

收稿日期: 2009-11-04。

作者简介:

焦彦军(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为电力系统继电保护;

于江涛(1973—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护, fisherhoper@sohu.com;

王增平(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 华北电力大学电气与电子工程学院院长, 主要研究领域为电力系统自动化及变电站综合自动化等。

(责任编辑 刘浩芳)